



RAUTATIELIIKENTEEEN AIKATAULUJEN ARVIOINTI PALVELUTASOTEKIJÖIDEN PERUSTEELLA

Markus Helelä

Aalto-yliopiston insinöörیتieteiden
korkeakoulun yhdyskunta- ja
ympäristötekniikan laitoksella
professori Tapio Luttisen valvonnassa
tehty diplomityö

Espoo 24.11.2014

Tekijä Markus Helelä

Työn nimi Rautatieliikenteen aikataulujen arviointi palvelutasotekijöiden perusteella

Koulutusohjelma Ympäristö- ja yhdyskuntatekniikka

Pää-/sivuaine Liikenne- ja tietekniikka**Professuurikoodi** Yhd-71

Työn valvoja Professori Tapio Luttinen, Aalto-yliopisto

Työn ohjaajat DI Jukka-Pekka Pitkänen, DI Maija Nurkka

Päivämäärä 24.11.2014**Sivumäärä** 118+41**Kieli** Suomi

Suomessa rautatieliikenteen aikataulujen arvioinnissa ja vertailussa ei hyödynnetä niiden palvelutasotekijät huomioivaa arviointikehikkoa, jossa tekijöiden tärkeys määräytyy rautatieliikenteen osapuolten aikataulusuunnittelun prioriteettien perusteella. Työssä kehitettiin kuvattu kehikko palvelemaan ratakapasiteetin jakamista ja aikataulusuunnittelua, mikä edellytti osapuolten palvelutasotavoitteiden ja suunnittelun prioriteettien sekä aikataulun palvelutasotekijöiden kuvaamista. Kehikkoon valittiin tärkeimmät siihen soveltuvat palvelutasotekijät, ja niille muodostettiin asiantuntijoiden tekemillä parivertailuilla painoarvot. Tapaustutkimuksessa tarkasteltiin käyttökelpoiselta vaikuttavan palvelutasotekijöiden määrittämismenetelmän soveltuvuutta aikataulujen arviointiin ja vertailuun.

Palvelutasotekijöistä tärkeimmät ohjaavat suunnittelua ja asettavat reunaehdoja muille niistä. Tekijöillä on keskinäisiä riippuvuuksia, joiden tunnistaminen selkeyttää suunnittelua. Riippuvuussuhteiden takia aikataulu on periaatteessa tietyillä painotuksilla tehty palvelutasotavoitteiden kompromissi. Aikataulun palvelutason arviointi edellyttää kehikon tekijöiden painottamista tärkeyden perusteella ja niiden mittaamista tai määrittämistä aikataulusta. Aikataulun häiriösietoisuus sai selkeästi suurimman painoarvon parivertailuilla; muiden tekijöiden painoarvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Vastauksissa korostui matkustajajunaliikenteen näkökulma.

Tapaustutkimuksessa todennettiin muutamia oletettuja palvelutasotekijöiden riippuvuuksia ja tehtiin tärkeitä lisähavaintoja: liikenteen heterogeenisuuden mittareilla on erittäin selkeä positiivinen korrelaatio junamäärän ja selkeä negatiivinen korrelaatio junien lisäämismahdollisuuden kanssa. Ratakapasiteetin käyttöastetta muistuttavan mittarin kanssa heterogeenisuuden mittareilla on hyvin selkeä positiivinen korrelaatio. Heterogeenisuuden perusteella voidaan arvioida aikataulun häiriösietoisuutta ja peilata sitä aikataulun junaväleihin, junien nopeuseroihin, junamääriin ja junien lisäämismahdollisuuteen.

Jatkosuosituksilla tähdätään ratakapasiteetin yhteensovittamisen ja aikataulujen arvioinnin kehittämiseen. Osapuolten kokoontumisessa, työn tuloksia hyödyntäen, voidaan muodostaa yhteisesti hyväksytty arviointikehikko palvelutasotekijöineen ja niiden painoarvoineen sekä sopia kehikon käyttötavoista. Palvelutasotekijöille on myös tärkeää määrittää minimilaatuvaatimus ja laatuasteikot raja-arvoineen. Liikenteen heterogeenisuuden mittarien käytössä olisi hyvä painottaa aikataulun junia ja junavälejä niiden tärkeyksien perusteella. Heterogeenisuuden mittarit eivät tarkastele suoraan tiettyjä matkustajille tärkeitä palvelutasotekijöitä, joten niiden määrittämismenetelmien ja laadun mittarien kehittäminen on tärkeää.

Avainsanat Suomen rautatieliikenne, rautatieliikenteen aikataulusuunnittelu, rautatieliikenteen palvelutaso, aikataulun palvelutasotekijät, ratakapasiteetti, analyyttinen hierarkiaprosessi

Author Markus Helelä

Title of thesis Railway Timetable Evaluation by Service Quality Parameters

Degree programme Transportation and Environmental Engineering

Major/minor Transportation Engineering**Code of professorship** Yhd-71

Thesis supervisor Professor Tapio Luttinen, Aalto-university

Thesis advisor(s) M. Sc. Jukka-Pekka Pitkänen, M. Sc. Maija Nurkka

Date 24.11.2014**Number of pages** 118+41**Language** English

A frame for evaluating and comparing railway timetables in which the importance of the service quality parameters (SQP) of the timetable is determined by the timetabling priorities of the railway transport parties is not utilized in Finland. In this study, the described frame was developed to serve rail capacity allocation and timetabling, which required description of the service quality goals and timetabling priorities of the parties as well as description of the SQPs of the timetable. The most important SQPs were chosen for the frame, and their weights were established with pairwise evaluations carried out by specialists. The applicability of a promising SQP definition method to the evaluation and comparison of timetables was examined in a case study.

The most important SQPs steer the timetabling process and set boundary conditions for other SQPs. The parameters have interdependencies whose recognition clarifies the timetabling process. Due to the interdependencies, the timetable is practically a compromise of the service quality goals, created with certain weighting. The evaluation of timetable service quality requires, in addition to weighing the parameters, measuring or specifying them from the timetable. Timetable robustness obtained clearly the highest weight with pairwise comparisons; the weights of the other parameters were very close to one another. A passenger rail transport viewpoint was emphasized in the answers given by the specialists.

In the case study, certain anticipated interdependencies of the SQPs were verified and important additional discoveries were made: the traffic heterogeneity indicators have a very strong positive correlation with the number of trains and a strong correlation with the increasing potential of trains. The heterogeneity indicators have a clear positive correlation with an indicator that resembles the railway capacity utilization rate. It is possible to evaluate timetable robustness on the grounds of heterogeneity and reflect this heterogeneity to the gaps between trains, the number of trains and the increasing potential of trains.

The presented recommendations aim at the development of rail capacity allocation and timetable evaluation. The railroad transport parties should gather together to form a mutually accepted evaluation frame and its weighted SQPs as well as to decide on its methods of application. It is also important to define a minimum quality requirement and quality scales for the parameters. When using the traffic heterogeneity indicators, it would be wise to weight the trains and the gaps between them according to their importance. The heterogeneity indicators do not directly examine certain service quality parameters important to passengers. Thus, it is important to develop specifying methods and quality indicators for those parameters.

Keywords Finnish railway transport, railway timetabling, railway service quality, service quality parameters of timetable, rail capacity, analytic hierarchy process

ALKUSANAT

Jukka-Pekka Pitkänen Rambollista ja RHK:n entinen Liikenteenhallintayksikön päällikkö Miika Mäkitalo ideoivat työn keskeisen ajatuksen ja mahdollistivat sen toteuttamisen, ja Pitkänen tutustutti minut itselleni vieraaseen aiheeseen. Työtäni ohjasi Pitkäsen lisäksi Maija Nurkka Liikennevirastosta. Jarkko Niittymäki Rambollista ja Heli Mattila Liikennevirastosta antoivat työhön liittyviä kommentteja. Työn valvojana toimi Tapio Luttinen Aalto-yliopistosta. Aalto-yliopiston henkilökunnasta haluan myös mainita minua monin tavoin auttaneen Virpi Ojalan. Kaikille mainituille kuuluu yhteinen kiitos. Kiitän myös työhön haastateltuja asiantuntijoita arvokkaasta yhteistyöstä. Rambollin liikenneyksikössä oli mahdollista tehdä työtä hyvässä ilmapiirissä, mitä pidän tärkeänä työssä jaksamiselle ja työn onnistumiselle.

Vanhempani ja puolisoni ovat olleet elämässäni ihailtavasti läsnä, ja heitä tahdon kiittää kokonaisvaltaisesta kärsivällisyydestä, ymmärryksestä ja tuesta taipaleellani työn ja opintojeni valmistumiseen.

Espoossa 24.11.2014,

Markus Helelä

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	4
KUVALUETTELO	8
TAULUKKOLUETTELO	12
1 JOHDANTO	16
1.1 Työn tausta	16
1.2 Työn tavoite	16
1.3 Työmenetelmä	17
2 RATAKAPASITEETIN JAKAMINEN JA RAUTATIELIIKENTEEN.....	19
AIKATAULUSUUNNITTELU	19
2.1 Ratakapasiteetin jakaminen	19
2.2 Aikataulusuunnittelun tavoitteet, vaatimukset ja haasteet	20
2.3 Graafinen aikataulu	22
2.4 Aikataulujen arviointi ja optimointi	23
2.4.1 Merkitys ja ongelmat	23
2.4.2 Analyttiset menetelmät	23
2.4.3 Rautatieliikenteen simulointi	24
2.4.4 Tilastollinen analyysi ja liikenteen täsmällisyys	25
3 AIKATAULUN PALVELUTASOTEKIJÄT	26
3.1 Rautatieliikenteen aikataulun palvelutaso ja sen tekijät	26
3.2 Häiriösietoisuus	26
3.2.1 Aikataulun häiriösietoisuus	26
3.2.2 Matkustajien häiriösietoisuus	27
3.3 Junan ajoaika osatekijöineen	29
3.3.1 Junan ajoajan muodostuminen	29
3.3.2 Teoreettinen, minimi- ja aikataulunmukainen ajoaika	30
3.3.3 Asemilla pysähdykset	30
3.3.4 Pelivara	33
3.3.5 Odotukset	37
3.3.6 Viive	38
3.4 Junamäärä	42
3.5 Junaväli	44
3.6 Junien nopeusero	47
3.7 Liikenteen heterogeenisuus	47
3.7.1 Liikenteen heterogeenisuus palvelutasotekijänä	47
3.7.2 Liikenteen heterogeenisuuden määrittäminen	48
3.8 Junien lisäämismahdollisuus	51
3.8.1 Junien lisäämismahdollisuus palvelutasotekijänä	51
3.8.2 Junien lisäämismahdollisuuden määrittäminen	52
3.9 Ratakapasiteetin käyttöaste	52
3.9.1 Ratakapasiteetin käyttöaste palvelutasotekijänä	52
3.9.2 Ratakapasiteetin käyttöasteen määrittäminen	54
3.10 Aikataulurakenne (vuoroväli ja aikataulun säännöllisyys)	57

3.10.1. Aikataulurakenne palvelutasotekijänä.....	57
3.10.2. Aikataulun säännöllisyyden ja rakenteen määrittäminen.....	58
3.11 Vaihtoyhteydet.....	60
3.12 Kalustokierto.....	61
4 TUTKIMUSMATERIAALIT JA MENETELMÄT.....	63
4.1 Asiantuntijahaastattelut ja asiantuntijoiden vastaukset kysymyslomakkeeseen ...	63
4.2 Arviointikehikko.....	63
4.3 Analyttinen hierarkiaprosessi ja asiantuntijoiden tekemät parivertailut	64
4.3.1 Analyttisen hierarkiaproessin kuvaus.....	64
4.3.2 Kriteerien preferenssien ja painoarvojen muodostaminen.....	67
4.4 Tapaustutkimuksen tavoitteet ja kuvaus	68
5 SUOMEN RAUTATIELIIKENTEN OSAPUOLET JA PALVELUTASOTAVOITTEET	71
5.1 Osapuolet.....	71
5.2 Palvelutaso käsitteenä	72
5.3 Osapuolten palvelutasotavoitteet ja aikataulusuunnittelun prioriteetit	72
5.3.1 Rautatieliikenteen yleiset palvelutasotavoitteet	72
5.3.2 Liikennevirasto – radanpitäjä	73
5.3.3 VR – rautatieyrittäjä; matkustajajunaliikenne.....	74
5.3.4 VR – rautatieyrittäjä; tavarajunaliikenne	76
5.3.5 HSL – matkustajajunaliikenteen tilaaja.....	78
5.3.6 Yhteenveto	79
6 ARVIOINTIKEHIKKO JA ANALYTTINEN HIERARKIAPROSESSI	81
6.1 Parivertailujen tulokset.....	81
6.2 Yhteenvetoja kriteerien valinta.....	84
7 TAPAUSTUTKIMUS	85
7.1 Tulokset.....	85
7.1.1 Kullasvaara–Luumäki.....	85
7.1.2 Lahti–Kouvola.....	86
7.1.3 Karjaa–Salon–Kupittaa.....	88
7.1.4 Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi.....	90
7.1.5 Oulunkylä–Kerava.....	92
7.1.6 Vaihtoehtoiset aikataulut ja Kerava–Tikkurila – ei puskurijaksoa vs. puskurijakso	94
7.1.7 Helsinki–Kerava – vakioaikataulurakenne vs. tasajunaväliaikataulurakenne	95
7.1.8 Lahti–Kouvola – matkustajajunaliikenteen vs. tavarajunaliikenteen priorisointi	98
7.2 Yhteenveto.....	100
8 YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA JATKOSUOSITUKSET.....	104
8.1 Yhteenveto.....	104
8.2 Päätelmät	107
8.3 Jatkosuositukset	110

LIITTEET

- Liite A.1 Matka-ajan osatekijöiden suomalaisia arvoja ja suositetut sanktiot myöhästymisille junatyypeittäin
- Liite A.2 Matka-ajan osatekijöiden eurooppalaisia arvoja
- Liite A.3 Myöhästymisen eurooppalaisia arvoja
- Liite B Asiantuntijoille lähetetty aikataulusuunnittelun prioriteettikysely
- Liite C.1 Asiantuntijoille lähetetty AHP:n mukainen parivertailukysely
- Liite C.2 Asiantuntijoiden vastaukset parivertailukyselyyn
- Liite D.1 Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 0.00–5.00 perjantaisin 5/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot
- Liite D.2 Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 14.30–18.30 perjantaisin 5/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot
- Liite D.3 Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 19.00–24.00 perjantaisin 5/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot
- Liite D.4 Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 2.00–6.00 perjantaisin 5/2011 ja Lahti–Kouvola-rataosan lähtötiedot
- Liite D.5 Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 8.00–12.00 perjantaisin 5/2011 ja Lahti–Kouvola-rataosan lähtötiedot
- Liite D.6 Kirkkonummi–Turku satama-aikataulu klo 6.00–11.00 perjantaisin 5/2011 ja Karjaa–Kupittaa-rataosan lähtötiedot
- Liite D.7 Helsinki–Turku satama-aikataulu klo 6.00–10.00 perjantaisin 5/2011 ja Pasila–Kirkkonummi-rataosan lähtötiedot
- Liite D.8 Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 6.00–10.00 perjantaisin 5/2011 ja Oulunkylä–Kerava-rataosan lähtötiedot
- Liite D.9 Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 19.00–23.00 perjantaisin 5/2011 ja Oulunkylä–Kerava-rataosan lähtötiedot
- Liite D.10 Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 7.00–9.00 perjantaisin 5/2011 ja Oulunkylä–Kerava-rataosan sekä vaihtoehtoisten aikataulujen lähtötiedot
- Liite D.11 Helsinki–Tampere-aikataulu klo 15.00–20.00 perjantaisin 5/2011 ja Helsinki–Kerava-rataosan lähtötiedot
- Liite D.12 Vaihtoehtoinen Helsinki–Tampere-aikataulu klo 15.00–20.00 perjantaisin 5/2011 Helsinki–Kerava-rataosalle ja rataosan lähtötiedot
- Liite D.13 Tavarajunalisäyksiä sisältävä Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 7.00–12.00 perjantaisin 5/2011 Lahti–Kouvola-rataosalle ja rataosan lähtötiedot
- Liite D.14 Vaihtoehtoinen Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 7.00–12.00 perjantaisin 5/2011 Lahti–Kouvola-rataosalle ja rataosan lähtötiedot

KUVALUETTELO

Kuva 1. Työvaihekaavio.....	18
Kuva 2. Graafinen aikataulu (RHK 2007).....	22
Kuva 3. Aikataulun yhteiskuntataloudellisen hyödyn riippuvuus ajoajan lisäosasta (Landex 2008).....	28
Kuva 4. Junan ajoajan osatekijät.....	29
Kuva 5. Aikataulutettu odotusaika yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).	29
Kuva 6. Aikataulunmukaisen ajoajan määrittäminen (Goverde 2005).	30
Kuva 7. Pysähdysajan osatekijät (Goverde 2005).....	31
Kuva 8. Kahden junan välisen vaihtoyhteyden toteuttaminen (Landex et al. 2006).	32
Kuva 9. Pääteasemille lisättävän kääntöajan puskuriajan vaikutus liikenteen säännöllisyyteen (värilliset viivat kuvaavat yksittäisiä linjoja, musta viiva junalinjojen keskiarvoa) (Hofman ja Madsen 2005).	33
Kuva 10. Pelivaran lisääminen teoreettiseen ajoaikaan aikataulussa (RHK 2007).	34
Kuva 11. Pelivaran käyttämisen vaihtoehdot (Goverde 2005).	35
Kuva 12. Pelivaran optimaalinen jakaminen matkan osille (Vromans 2005).	35
Kuva 13. Pelivaran optimaalisen jakamisen vaikutus keskimääräiseen viiveeseen verrattuna tasaisesti jaettuun pelivaraan (Vromans 2005).....	36
Kuva 14. Käytetty ja käyttämätön pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla sekä optimaalisesti että tasaisesti jaetulle pelivaralle (Vromans 2005).	36
Kuva 15. Optimaalinen pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla häiriöiden keskimääräisen keston summan eri arvoilla (Vromans 2005).	37
Kuva 16. Optimaalinen pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla täsmällisyyden raja-arvoilla 1–5 minuuttia (Vromans 2005).	37
Kuva 17. Junien kohtaaminen yksiraiteisella rataosalla (RHK 2007).....	38
Kuva 18. Viiveen tapahtumapaikan ja sille altistuneen junan nopeustason vaikutus viiveen ketjuuntumiseen kaksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).....	40
Kuva 19. Viiveiden ketjuuntuminen molempiin ajosuuntiin yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).....	40
Kuva 20. Junien saapumisviiveiden vaikutus lähtöviiveisiin (junamäärä [%] kuvaa, kuinka suuri osa junista saapuu tai lähtee tietyn viiveen [min] puitteissa. (Carey 2000)	40
Kuva 21. Junien asemille saapumisaikojen keskimääräisen viiveen ja liikenteen säännöllisyyden välinen riippuvuus (Hofman ja Madsen 2005).....	41
Kuva 22. Junamäärän vaikutus aikataulun häiriöherkkyyteen (Liikennevirasto 2010c).	42
Kuva 23. Junamäärän vaikutus keskimääräiseen viiveeseen ja siihen perustuva optimijunamäärä (Kandels ja Gröger 2005).	42
Kuva 24. Ohitus- ja kohtauspaikkojen lukumäärän ja junamäärän vaikutus junien keskimääräiseen ajoaikaan (Ferreira ja Higgins 1996).	42
Kuva 25. Keskimääräinen sekundaarinen viive ja viiveen todennäköisyys junamäärän (junaa/h) funktiona kaksiraiteisella rataosalla, jossa liikenne on heterogeenista eikä ohittaminen ole sallittua (IC tarkoittaa kaukojunia ja IR lähijunia) (Huisman ja Boucherie 2001).	43

Kuva 26. Liikenteen säännöllisyyden riippuvuus junalinjojen määrästä (sininen viiva kuvaa riippuvuutta alun perin 12 junalinjaa ja punainen 11 junalinjaa sisältäneessä aikataulussa) (Hofman ja Madsen 2005).	43
Kuva 27. Aikataulun junamäärän riippuvuus liikenteen heterogeenisuudesta (Landex 2008).	44
Kuva 28. Junavälit aikataulussa (RHK 2007).	44
Kuva 29. Minimijunavälin, opastinvälin pituuden ja opastinvälin varausajan yhteys (RHK 2007).	44
Kuva 30. Opastinvälin varausaika (Pachl 2002).	45
Kuva 31. Junien lisäämisen vaikutus viiveiden ketjuuntumiseen (Gibson 2002).	45
Kuva 32. Puskurijakson ja puskurijakson lisääminen aikatauluun (Pachl 2002).	46
Kuva 33. Junien nopeuserojen vaikutus ratakapasiteettiin (Liikennevirasto 2010c).	47
Kuva 34. Junanopeuksiltaan homogeeniset aikataulut A ja B sekä junanopeuksiltaan heterogeeninen aikataulu C (Carey 1999).	49
Kuva 35. SSHR-mittarin ja junien keskimääräisen saapumisviiveen välinen riippuvuus (Vromans 2005).	50
Kuva 36. SAHR-mittarin ja junien keskimääräisen saapumisviiveen välinen riippuvuus (Vromans 2005).	50
Kuva 37. Liikenteen homogeenisuudeltaan eroavat aikataulut (Landex 2008).	51
Kuva 38. Aikataulurakenteen vaikutus junien lisäämiseen (Pitkänen 2006).	51
Kuva 39. Junan lisääminen aikatauluun (Pitkänen 2006).	51
Kuva 40. Junien lisäämismahdollisuus yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).	52
Kuva 41. Ratakapasiteetin käyttöasteen kätkemä tieto kapasiteetin hyödyntämisestä (Landex 2008).	53
Kuva 42. Junien ryhmittelyn vaikutus ratakapasiteetin käyttöasteeseen (Landex 2006).	53
Kuva 43. Ratakapasiteetin käyttöasteen vaikutus täsmällisyyteen (Landex et al. 2006b).	53
Kuva 44. Häiriöiden intensiivisyyden vaikutus junien keskimääräiseen viiveeseen ja viivästyneiden junien määrään ratakapasiteetin eri käyttöasteilla (Meng ja Goverde 2011).	54
Kuva 45. Kohtaus- ja ohituspaikkojen perusteella tapahtuvan aikataulun jakamisen vaikutus ratakapasiteetin käyttöasteeseen UIC:n menetelmässä (Landex et al. 2006).	55
Kuva 46. Aikataulun puristaminen kaksiraiteisella rataosalla (Pachl 2008).	56
Kuva 47. Junan lisäämismahdollisuus aikataulun puristamisen jälkeen (Landex et al. 2006b).	56
Kuva 48. Tarkastelualueen laajentamisen vaikutus aikataulun puristamiseen (Landex et al. 2006b).	56
Kuva 49. Säännöllisyysindeksi RI ja rakenneindeksi SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).	58
Kuva 50. Kahden ruuhka-ajan ulkopuolisen aikatauluviivan poistamisen vaikutus indekseihin RI ja SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).	59

Kuva 51. Neljän aikatauluviivan ruuhka-ajoille lisäämisen vaikutus indekseihin RI ja SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).	59
Kuva 52. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun 4 lisättyä aikatauluviivaa tulkitaan virheellisesti aikataulurakennetta noudattamattomiksi (Tzieropoulos ja Emery 2009). ..	59
Kuva 53. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun neljä lisättyä aikatauluviivaa tulkitaan oikealla tavalla (Tzieropoulos ja Emery 2009).	60
Kuva 54. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun lisätään neljä aikataulurakennetta noudattamatonta aikatauluviivaa (Tzieropoulos ja Emery 2009).	60
Kuva 55. Huonot ja hyvät vaihtoyhteydet kahden junavaihdon matkaketjulle (Landex 2008).	61
Kuva 56. Arviointikehikko ja analyttinen hierarkiaprosessi.	64
Kuva 57. AHP:n mukainen arviointikehikon hierarkia.	67
Kuva 58. Liikenneviraston rataliikennekeskuksen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.	74
Kuva 59. VR:n matkustajajunaliikenteen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.	76
Kuva 60. VR:n tavarajunaliikenteen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.	78
Kuva 61. HSL:n tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.	79
Kuva 62. Luumäki–Kullasvaara-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.	86
Kuva 63. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.	87
Kuva 64. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.	87
Kuva 65. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.	88
Kuva 66. Karjaa–Salo–Kupittaa-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.	89
Kuva 67. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.	91
Kuva 68. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.	91
Kuva 69. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.	92
Kuva 70. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.	93
Kuva 71. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.	93
Kuva 72. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.	94

Kuva 73. Vaihtoehtoisille aikatauluille ja Kerava–Tikkurila-rataosan eri aikataulurakenteiden samalle suunnalle ja aikavälille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.	95
Kuva 74. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus eri aikataulurakenteissa.	96
Kuva 75. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus eri aikataulurakenteissa.	97
Kuva 76. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista eri aikataulurakenteissa.	97
Kuva 77. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle ja aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.	98
Kuva 78. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.	99
Kuva 79. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.	99
Kuva 80. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä.	100
Kuva 81. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta.	101
Kuva 82. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.	102

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Matka-ajan pidennystekijöiden painoarvot ja ylimääräisen odotusajan kustannus (PEWC) (Dewilde et al. 2011)	28
Taulukko 2. Matkustajien toimintavaihtoehdot ja niiden mahdollisen ylimääräisen odotusajan kustannuksen (PEWC) syyt (Dewilde et al. 2011)	28
Taulukko 3. AHP:n suhdeasteikko	65
Taulukko 4. AHP:n vertailumatriisi	65
Taulukko 5. AHP:n satunnaisindeksit	66
Taulukko 6. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus, painoarvojen ja johdonmukaisuuden aritmeettiset keskiarvot ja keskihajonta	81
Taulukko 7. Kriteerien ominaisarvot	82
Taulukko 8. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus, painoarvojen ja johdonmukaisuuden aritmeettiset keskiarvot ja keskihajonta (häiriösietoisuus ei mukana painottamisessa)	82
Taulukko 9. Kriteerien ominaisarvot (häiriösietoisuus ei mukana painottamisessa)	83
Taulukko 10. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus Suomen rautatieliikenteen pääosapuolittain	84
Taulukko 11. Luumäki–Kullasvaara-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liitteet D1–3)	85
Taulukko 12. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D4-5)	86
Taulukko 13. Karjaa–Salo–Kupittaa-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D6)	89
Taulukko 14. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D7)	90
Taulukko 15. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liitteet D8–9)	92
Taulukko 16. Kuvitteellisille rataosille ja Kerava–Tikkurila-rataosan eri aikataulurakenteiden samalle suunnalle ja aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D10)	94
Taulukko 17. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit vakio- ja tasavuoroaikataulurakenteissa ja junamäärät (liitteet D11-12)	96
Taulukko 18. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle ja aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät matkustajajunaliikenteen ja tavarajunaliikenteen priorisoivissa aikataulurakenteissa	98

MÄÄRITELMÄT

Aikataulun häiriösietoisuus kuvaa, kuinka paljon häiriöt aiheuttavat liikenteelle viiveitä ja niiden ketjuuntumista sekä kuinka hyvin liikenne palautuu niistä normaaliin tilaan.

Aikataulun palvelutaso kuvaa, kuinka hyvin ennalta määritetyt liikenteelliset palvelutasotavoitteet kokonaisuudessaan toteutuvat aikataulussa.

Aikataulun säännöllisyys kuvaa aikataulun junavälien keskihajontaa; mitä pienempi keskihajonta, sitä säännöllisempi aikataulu on.

Aikataulutettu odotusaika tarkoittaa junan ajoaikaan syntyviä, junien välisistä riippuvuuksista johtuvia aikahukkia aikatauluviivojen yhteensovittamisessa.

Arviointikehikko hyödyntää tässä työssä analyttistä hierarkiaprosessia, ja sillä voidaan määrittää tarkasteltavan aikataulun palvelutaso.

Graafinen aikataulu on yleisin esitystapa rautatieliikenteen aikataululle. Se kuvaa havainnollisesti liikenteen kulun ja määrittää periaatteet rataosan varaamiselle junille. Suomessa sen x-akseli kuvaa aikaa ja y-akseli matkaa.

Joustokerroin tarkoittaa suhdetta, jolla selitettävä tekijä muuttuu suhteessa selittävään tekijään.

Junakalusto tarkoittaa junia, joilla aikataulu voidaan liikennöidä.

Junalinja tarkoittaa ennalta määrätyn aikataulun mukaisesti tietyllä reitillä liikennöiviä ja tietyillä reitin varrella olevilla asemilla pysähtyviä junia, joilla on sama linjatunnus.

Junan ajoaika tarkoittaa todellista kestoa junan kululle kahden paikan välillä. Se koostuu teoreettisesta ajoajasta, asemilla pysähdyksistä, pelivarasta, odotuksista ja viiveestä.

Junan ajoajan lisäosa muodostuu pelivarasta ja puskuriajasta.

Junaväli ja minimijunaväli kuvaavat peräkkäisten junien aikaväliä. Minimijunaväli riippuu rataosan suojastuksesta, ja se saadaan selville tiivistämällä opastinvälien varausaikaportaikot mahdollisimman lähelle toisiaan.

Junien etusijajärjestys määrittää junien priorisoinnin järjestyksen ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisessa.

Junien välinen riippuvuus tarkoittaa tilannetta, jossa junan suunnitellun kulun toteutuminen edellyttää vähintään yhden muun junan kulkua suunnitellusti tai tiettyjen reunaehtojen mukaisesti.

Kalustokierto kuvaa, miten junakalusto on sidottu aikatauluviivoihin. Kalustokierron lisääminen vähentää tarvittavan kaluston määrää ja junien odotusaikoja ratapihoilla.

Kääntöaika tarkoittaa aikaa, jonka juna viettää pääteasemalla ennen matkansa jatkamista. Se koostuu muun muassa erilaisista tarkastuksista, siivouksista ja vaihtotyöstä.

Liikenteen heterogeenisuus kuvaa junien keskinopeuksien ja junavälien vaihtelua tarkasteltavalla rataosalla. Liikenne on sitä heterogeenisempaa, mitä suurempaa niiden vaihtelu on.

Liikenteen luotettavuus määräytyy junalinjan keskimääräisen myöhästymisen ja matka-ajan vaihtelun suuruuden perusteella.

Liikenteen säännöllisyys kuvaa todellisten lähtöjen tai saapumisten määrää suhteessa aikataulun mukaisiin lähtöihin tai saapumisiin.

Liikenteen täsmällisyys kuvaa, alittaako juna aikataulupoikkeamalle asetetut hyväksytyt maksimiarvot tarkastelupisteessä.

Matka-aika tarkoittaa tässä työssä matkustajan junassa oloon ja junavaihtoon käyttämänsä aikaa matkaketjussaan.

Myöhästyminen syntyy, juna on ylittänyt aikataulupoikkeamalle asetetut hyväksytyt maksimiarvot tarkastelupisteessä; tällöin se on epätasällinen.

Odotukset aiheutuvat junakohtaamisista ja -ohituksista. Ne sisältävät jarruttamiseen, pysähdyksissä olemiseen ja kiihdyttämiseen kuluva ajan.

Opastinväli tarkoittaa kahden opastimen rajaamaa aluetta, joka voi olla kerrallaan vain yhden junan käytössä.

Opastinvälin varausaika tarkoittaa aikaa, jonka juna varaa itselleen kulkiessaan opastinvälin läpi.

Palvelutasotekijä kuuluu palvelutasotekijöiden muodostamaan ryhmään, jonka perusteella aikataulun palvelutaso määräytyy.

Pelivara lisätään junan teoreettiseen ajoaikaan, jotta junalla on mahdollisuus pysyä aikataulussa matkalla sattuneesta häiriöstä huolimatta. Se kattaa sellaiset ajan vaihtelut, joiden laskemiseen ei ole yksiselitteistä kaavaa.

Primaarinen häiriö vaikuttaa suoraan junan kulkuun eikä aiheudu toisesta junasta.

Puskuriaika lisätään minimijunaväliin häiriöiden leviämisen estämiseksi tai vaimentamiseksi. Se määrittää, kuinka paljon juna voi poiketa aikataulustaan vaikuttamatta toisen junan kulkuun.

Pysähdysaika tarvitaan matkustajien poistumiseen junasta ja junaan nousemiseen.

Ratakapasiteetti kuvaa radan liikenteenvälityskykyä (junaa/aikayksikkö). Se riippuu monista tekijöistä, eikä sille voida suhteellisen käsitteellisyytensä takia määrittää yksiselitteistä arvoa.

Ratakapasiteetin käyttöaste on liikennöinnin prosentuaalinen osuus tietystä ajanjaksosta.

Sekundaarinen häiriö aiheutuu muille junille, kun yksi tai useampi juna altistuu primaariselle häiriölle.

Vaihtoaika tarvitaan matkustajien poistumiseen junasta, kävelemiseen ja junaan nousemiseen.

Vaihtoyhteys tarkoittaa kahden junan välistä vaihtoa, joka matkustajan on tehtävä jatkaakseen matkaketjuaan.

Vakioaikataulurakenne noudattaa symmetriaa tietyn liikennepaikan suhteen. Siinä junat lähtevät ja saapuvat säännöllisin vuorovälein tietyllä vakiominuuttiluvulla. Junat kulkevat junalinjan molempiin suuntiin toisiinsa nähden peilikuvina.

Viiveiden ketjuuntuminen johtuu junien välisistä riippuvuuksista ja alkaa, kun junan viiveen takia myös toinen tai useampi juna kokee viiveen.

Viive tarkoittaa junan toteutuneen ajoajan ja aikataulunmukaisen ajoajan eroa minuuteissa. Viiveet johtuvat primaarisista ja sekundaarisista häiriöistä.

Vuoroväli tarkoittaa saman junalinjan peräkkäisten vuorojen aikaväliä tietyllä asemalla.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Rautatieliikenteen pääasiallisena tavoitteena on kuljettaa mahdollisimman suuri määrä matkustajia ja kuormaa mahdollisimman pienillä investointi-, operointi- ja ylläpitokustannuksilla, kaluston ja henkilöstön määrällä sekä energiankulutuksella. Matkustajien, rautatieyritysten ja viranomaisten tyytyväisyys rautatieliikenteeseen riippuu sen ajo- ja matka-aikojen, liikennetiheyden, matkustusmukavuuden, täsmällisyyden, turvallisuuden ja kustannusten kilpailukyvyistä. Kilpailukykyinen palvelutaso edellyttää laadukasta ja tarkasti suunniteltua aikataulua. (Hansen 2010.)

Ratahallintokeskuksen (RHK, nykyisin Liikennevirasto) A-sarjassa on julkaistu seuraavat tutkimukset, joissa käsitellään muun muassa rautatieliikenteen aikataulusuunnitteluun ja täsmällisyyteen liittyviä asioita: Pitkänen (2006), Mukula (2008), Musto (2008), Salkonen (2008), Sipilä (2008) ja Nervola (2009). Niissä ei kehitetty aikatauluvaihtoehtojen arviointiin soveltuvaa, aikataulun palvelutasotekijät rautatieliikenteen osapuolten aikataulusuunnittelun prioriteettien perusteella huomioivaa arviointikehikkoa, jollaiselle on viimeistään hiljattain tunnistettu tarve.

Euroopassa on viime vuosina kehitetty monia analyttisiä menetelmiä aikataulujen luomiseen ja optimointiin. Niissä huomioidaan vaihteleva määrä aikataulun palvelutasotekijöitä, joista osan määrittäminen perustuu matemaattisiin yhtälöihin. Niiden joukosta ei kuitenkaan löydy aikataulujen kokonaisvaltaiseen arviointiin ja vertailuun helppokäyttöistä menetelmää, jossa tärkeytensä mukaan painotettaville palvelutasotekijöille on omat mittarinsa. Useimmiten menetelmät optimoivat aikatauluja tietyn palvelutasotekijän mukaan niin, että korkeintaan muutamalla muulle palvelutasotekijälle asetetaan hyväksytyt raja-arvot.

Suomessa aikatauluvaihtoehtojen arviointi ja vertailu perustuu ratakapasiteettihakemusten perusteella jaetun kapasiteetin yhteensovittajan kokemukseen ja näkemykseen. Kapasiteetin jakamisen ja aikataulusuunnittelun apuna käytetään LIIKE-järjestelmää, jonka rinnalla suunnittelussa hyödynnetään Viriato-ohjelmaa.

Arviointikehikon puuttuminen heikentää nykyisen järjestelmän uskottavuutta: rautatieliikenteen osapuolille voi syntyä luottamuspuutteita ratakapasiteetin jakamisen perusteisiin. Mäkitalon (2007) tekemän kyselytutkimuksen vastaajista puolet koki, ettei Liikennevirasto pysty tekemään kaikkien rautatieyritysten kannalta tasapuolisia päätöksiä. Perusteet olivat pääasiassa jaettavissa seuraaviin luokkiin: tasapuolisuuden puute, puolueellisuus, VR:n suosiminen ja tarvittavan henkilöstön, työkalujen ja muiden resurssien puutteellisuus.

1.2 Työn tavoite

Suomen rautatieliikenteessä ei ole käytössä aikataulun laadun määrittävää palvelutasoluokittelua, joka perustuisi aikataulun palvelutasotekijät huomioivaan arviointikehikkoon. Aikataulun laatu heijastuu suoraan liikenteen täsmällisyyteen, joka

on ainoa yleisesti käytössä oleva liikennöinnin sujuvuutta kuvaava mittari Suomen rautatieliikenteessä.

Työn tavoitteena on kehittää Liikennevirastolle arviointikehikko ratakapasiteetin jakamisen ja aikataulusuunnittelun tueksi ja selvittää tekijöitä, joiden perusteella aikataulun palvelutasoluokittelu voitaisiin tulevaisuudessa rakentaa. Lisäksi työssä on tarkoitus vastata seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitkä ovat rautatieliikenteen aikataulun palvelutasotekijät?
2. Miten palvelutasotekijät riippuvat toisistaan?
3. Miten palvelutasotekijät voidaan mitata tai määrittää aikataulusta?
4. Mitkä ovat rautatieliikenteen osapuolten aikataulusuunnittelun prioriteetit?
5. Miten muodostetaan palvelutasotekijöiden painoarvot käyttökelpoisen arviointikehikon luomiseksi?
6. Mitkä palvelutasotekijöiden määrittämismenetelmät soveltuvat arviointikehikon käytön tueksi?

Mukula (2008) toteaa Liikennevirastolta edellytettävän jatkossa laajempaa aikataulusuunnitteluosaamista tavarajunaliikenteen kilpailun avautumisen ja mahdollisten uusien rautatieyritysten markkinoille tulemisen takia. Tämän työn tutkimuskysymykset liittyvät suoraan näihin tarpeisiin. Työ on askel kohti aikataulujen parantamista: rautatieliikenteen osapuolten aikataulusuunnittelun prioriteetit ja ratakapasiteetin jakamisen vaihtoehdot voidaan huomioida analyttisemmin. Samalla palvellaan pitkän aikavälin aikataulusuunnittelua, ja mahdollisesti löydetään periaatteita ratakapasiteetin hinnoitteluun.

1.3 Työmenetelmä

Luvut 2 ja 3 muodostavat työn teoreettisen osan, jolla vastataan tutkimuskysymyksiin 1–3. Luvut 5–7 muodostavat työn empiirisen osan (vastaus tutkimuskysymyksiin 4–6), jonka tutkimusmateriaali- ja menetelmät kuvataan luvussa 4.

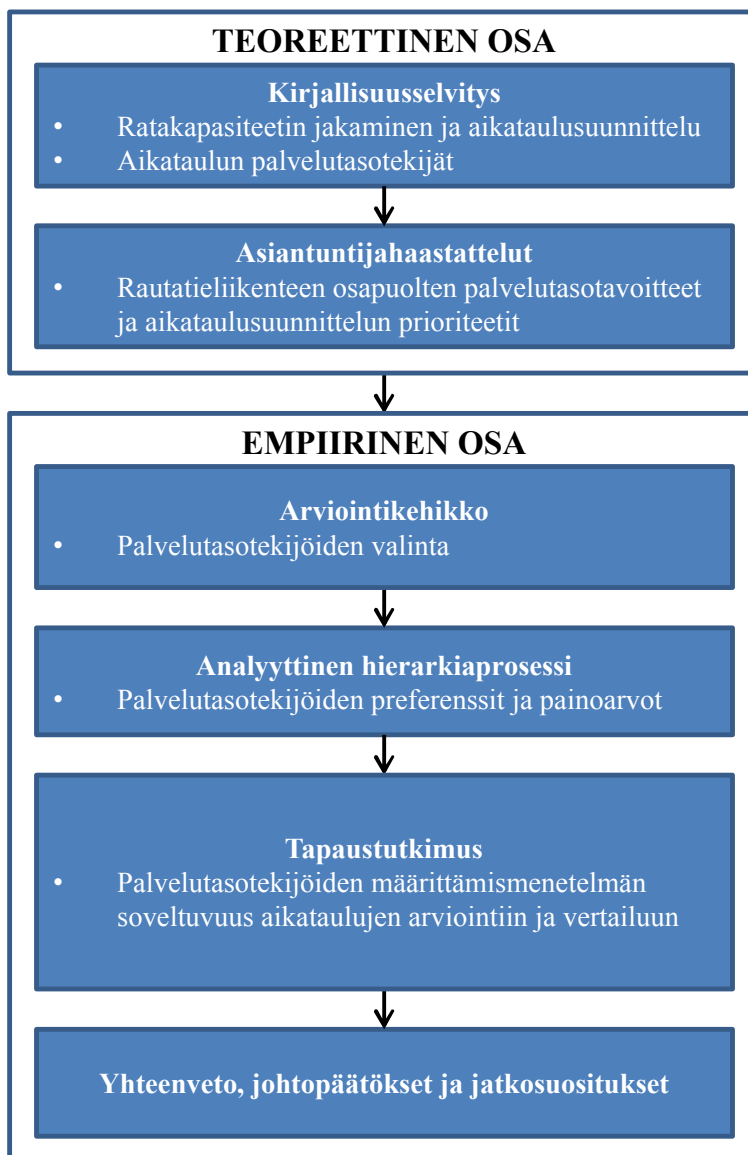
Luvussa 2 kuvataan ratakapasiteetin jakamisen pääperiaatteet Suomen rautatieliikenteessä ja aikataulusuunnitteluun liittyviä tekijöitä. Aikataulun palvelutasotekijät ja niiden määrittämismenetelmät esitellään luvussa 3; oleellista on kuvata palvelutasotekijöiden merkitys aikataulusuunnittelussa ja niiden keskinäiset riippuvuudet. Työssä esitellyt palvelutasotekijöiden määrittämismenetelmät ovat matemaattisesti helpotajuisia, mikä ei välttämättä tarkoita niiden olevan yksiselitteisiä tai yksinkertaisia käyttää.

Luvussa 5 hahmotetaan Suomen rautatieliikenteen osapuolten palvelusotavoitteet ja aikataulusuunnittelun prioriteetit pääasiassa osapuolten asiantuntijoiden avoimiin haastatteluihin ja heille lähetettyyn aikataulusuunnittelun prioriteettikyselyyn (liite B) perustuen. Asiantuntijoiden tehtäväkuvat eroavat toisistaan, mutta jokaisella on vankka kokemus rautatiealalta. Tämän ansiosta arvokasta tietoa saadaan eri näkökulmista. Haastatteluista saatiin työn muitakin lukuja varten hyödyllistä asiasisältöä. Viittauksissa henkilö on mainittu ilman vuosilukua, jotta niitä ei sekoitettaisi kirjallisuusviitteisiin. Lista haastatteluista löytyy kokonaisuudessaan lähdeluettelon kirjallisuuslähteiden perästä.

Luvussa 6 työn teoreettisen osan ja asiantuntijavastausten perusteella arviointikehikkoon valituille palvelutasotekijöille muodostetaan asiantuntijoiden tekemillä parivertailuilla preferenssit ja painoarvot luvussa 4.3 kuvatun analyttisen hierarkiaproessin (AHP) mukaisesti.

Tapaustutkimus muodostaa luvun 7. Siinä tutkitaan käyttökelpoiselta vaikuttavan palvelutasotekijöiden määrittämismenetelmän soveltuvuutta aikataulujen arviointiin ja vertailuun. Tavoitteena on saada samansuuntaisia tuloksia ja johtopäätöksiä, mitä simuloinneilla ja käytännön kokemuksella on saatu.

Luvussa 8 esitetään yhteenveto työn tärkeimmistä tuloksista, päätelmät ja jatkosuositukset. Kuvassa 1 on esitetty työvaihekaavio.



Kuva 1. Työvaihekaavio.

2 RATAKAPASITEETIN JAKAMINEN JA RAUTATIELIIKENTEEN AIKATAULUSUUNNITTELU

2.1 Ratakapasiteetin jakaminen

Ratakapasiteetti tarkoittaa radan liikenteenvälityskykyä (junaa/aikayksikkö). Sille ei suhteellisen käsitteellisyytensä takia voida määrittää yksiselitteistä arvoa, vaan se riippuu aikataulun häiriösietoisuuden, junamäärän ja junien nopeuksien sekä liikenteen heterogeenisuuden välisistä suhteista. Kyseiset tekijät ovat yleensä riippuvaisia toisistaan, ja liikennöintitarpeet sanelevat niiden suunnittelua. Kapasiteettiin vaikuttavat myös junakaluston ominaisuudet sekä ratageometria ja -infrastruktuuri. Sitä vähentävät junien lähettämiseen ja kulkuun, henkilöstön aikatauluttamiseen ja ratainfrastruktuuriin liittyvät ongelmat sekä ulkoiset tekijät, kuten sääolosuhteet, onnettomuudet ja asemien matkustajamäärät. (Landex 2008.) Pitkäsen mukaan aikataulusuunnittelu on kaluston uusimisen ohella ainoa tapa lisätä kapasiteettia ilman kalliita ratainvestointeja.

Rautatieyritykset voivat hakea säännöllistä liikennettä varten valtion rataverkon ratakapasiteettia Liikennevirastolta. Rautatieyritys sovittaa yhteen oman liikenteensä, Liikennevirasto puolestaan jokaisen rautatieyritysten hakemuksen. Kapasiteettihakemukseen sisältyviä tietoja ovat muun muassa

- aikataulu
- junan kulkuajat, -päivä, ja -kaudet
- junan lähtö- ja saapumisaika
- junatyyppejä
- junan suurin sallittu nopeus
- junanumero
- junan etusijaisuusjärjestyksen luokka
- matkustajajunien pysähdyskäyttäytyminen
- tavarajunien käsittelypaikat
- muut liikennettä koskevat tiedot. (RHK 2004)

Aikataulusuunnittelun yhdenmukaisuuden varmistamiseksi pitää ratakapasiteettihakemuksissa käyttää Liikenneviraston julkaisemaa verkkoselostusta. Liikenneviraston laatima aikatauluehdotus perustuu ensisijaisesti haetun kapasiteetin myöntämiseen. Liikennevirasto voi kuitenkin tarjota kapasiteetin käytön tehostamiseksi hakijalle kapasiteettia, joka ei oleellisesti poikkea haetusta. (Liikennevirasto 2010)

Liikennevirasto toimittaa aikatauluehdotuksen ratakapasiteetin hakijoille määräaikaan mennessä, ja hakijoilla on oikeus tulla kuulluksi 30 päivän sisällä siitä. Jos samaa kapasiteettia on hakenut useampi hakija tai haettu kapasiteetti vaikuttaa toisen hakijan hakemaan kapasiteettiin, Liikennevirasto yhteensovittaa haetun kapasiteetin. (Liikennevirasto 2010.)

Ellei ratakapasiteetin yhteensovittaminen onnistu, Liikennevirastolla on rautatielaissa säädetyin perustein oikeus käyttää junien etusijajärjestystä (Liikennevirasto 2010), mutta Pitkäsen mukaan myös poiketa siitä. Nurkan mukaan VR esimerkiksi voi antaa Liikenneviraston rataliikennekeskukselle huomioitavaksi ohjeistuksen juniensa välisestä priorisoinnista.

Suomessa junien etusijajärjestys on:

1. Synerginen matkustajajunaliikennekokonaisuus (esimerkiksi vakioaikataulun mukainen liikenne)
2. Nopea matkustajajunaliikenne, joka ei kuulu synergiseen matkustajajunaliikennekokonaisuuteen
3. Teollisuuden prosesseihin sidottu kuljetus
4. Taajamajunaliikenne ja muu matkustajajunaliikenne
5. Muu säännöllinen tavarajunaliikenne
6. Tavarajunaliikenne, jolla ei ole suurta aikatauluvaatimusta
7. Muu liikenne. (Liikennevirasto 2010)

Liikenneviraston on jaettava ratakapasiteetti tasapuolisin ja syrjimättömin perustein, mikä edellyttää jokaisen osapuolen, erityisesti rautatieyritysten ja radanpidon, tarpeiden huomioimista. Myös rataverkon tehokas käyttö sanelee kapasiteetin jakamista. Lisäksi, erikoistunutta ja ylikuormittunutta kapasiteettia koskevat etusijajärjestykset on huomioitava. Kapasiteetin jakoon tyytymätön hakija voi hakea Liikenteen turvallisuusvirastolta oikaisua päätökseen. (Liikennevirasto 2010.)

Kososen mukaan ratakapasiteetin jakamiseen tarvitaan oikeudenmukainen ja selkeä menettelytapa uusien rautatieyritysten aloitettua liikennöinnin. Liikennevirastolta tarvitaan pohja, josta käy ilmi kunnossapitoajat ja muu oleellinen tieto. Sen pohjalta rautatieyritys voisi suunnitella oman liikenteen; kaksiraiteisille rataosille esimerkiksi määritettäisiin matkustajajunaliikenteen tarjonta ja jäljelle jäävä tavarajunaliikenteen tarjonta. Näiden rautatieyrityksille varattujen ratakapasiteettiaukkojen perusteella rautatieyritykset rakentaisivat oman liikenteensä; yrityksillä olisi oltava mahdollisuus joustoon ratakapasiteettiaukkojensa sisällä. Lopuksi Liikennevirasto yhteensovittaisi kapasiteetin muun muassa konfliktien perusteella. Nurkan mukaan yhteensovittaminen pyritään tekemään osapuolten kanssa käytävien neuvottelujen pohjalta, joissa vaikutukset kalusto- ja henkilöstökiertoon huomioidaan.

2.2 Aikataulusuunnittelun tavoitteet, vaatimukset ja haasteet

Aikataulun tarkoitus on yhteensovittaa ratakapasiteettihakemukset, kuvata junien kulku ja antaa tietoa asiakkaille. Aikataulusuunnittelulla vaikutetaan matkustajille tarjottavaan palvelutasoon, liikennöintikustannuksiin ja -tuottoihin sekä kapasiteetin käyttöön. (Yuan ja Hansen 2007.) Suurten liikennevirtojen hallinta rajallisilla resursseilla edellyttää toimivaa aikataulua (Mäkitalo 2001). Etenkin liikenteen täsmällisyystiedoilla ja -vaatimuksilla, sujuvuudella ja turvallisuudella on suuri merkitys suunnittelussa (RHK 2007). Oksasen mukaan suunnittelulla voidaan myös tutkia, miten tulevaisuuden liikennemäärä toimii tietyllä ratainfrastruktuurilla.

Aikataulusuunnittelulle reunaehdoja asettavista tekijöistä tärkeitä ovat etenkin ratainfrastruktuuri, kalustokierto, henkilöstö ja asiakkaat (Mäkitalo 2001). Suunnittelulla voidaan vaikuttaa moneen palvelutasotekijään, mutta sen tavoitteet ovat usein ristiriidassa keskenään. (Mukula 2008). Esimerkiksi aikataulun tiukentaminen voi heikentää liikenteen täsmällisyyttä. (Mukula 2008.) Suorien junayhteyksien runsaus puolestaan tyydyttää asiakasta, muttei tee aikataulusta kustannustehokasta (Peeters 2003).

Dewilde et al. (2011) listaa optimaalisen aikataulun yleisimpiä kriteereitä. Junille ne ovat

- keskimääräisen viiveen minimointi
- sekundaaristen viiveiden minimointi
- viiveistä palautumisen keston minimointi
- liikenteen täsmällisyyden maksimointi
- menetettyjen vaihtoyhteyksien minimointi.

Matkustajien kriteerit ovat

- keskimääräisen viiveen minimointi
- vaihtoyhteyksien ja -ajan optimointi
- keskimääräisen matka-ajan minimointi.

Oksasen mukaan aikataulusuunnittelussa on usein tehtävä kompromisseja ja muokkauksia. Suunnittelijan pitää tuntea rataverkko ja sen asettamat reunaehdot hyvin. Hovin mukaan suunnittelu ei ole suoraviivaista, täsmällistä ja systemaattisesti laskukaavoihin nojautuvaa, vaan edellyttää paljon pohdintaa, tulkintaa ja soveltamista. Erot rautatieliikenteen osapuolten prioriteeteissa vaikeuttaa suunnittelua (RHK2007).

Rataverkon suljetun luonteen ja junien välisten riippuvuuksien takia pienikin poikkeama junan suunnittelusta kulusta voi vaikuttaa muiden junien kulkuun, joten junien nopeudet, kohtaamiset ja ohitukset, pysähdykset ja junavälit on suunniteltava tarkkaan. (RHK 2007.) Riippuvuuksien vähentämisellä voidaan parantaa liikenteen täsmällisyyttä, mutta sitä ei pidä tehdä liikaa esimerkiksi matka-ajan kustannuksella (Vromans 2005);

Oksasen mukaan hyvä aikataulu on teknisesti toimiva, kaupallisesti kilpailukykyinen ja kustannustehokas. Ilman teknistä toimivuutta eivät muutkaan ehdot täyty. Suomessa täysi varmuus siitä perustuu rataverkolla eri nopeuksilla ajettaviin koeajoihin. Pitkäsen mukaan muualla Euroopassa käytetään enemmän simuloitteja.

Oksasen mukaan aikataulun on palveltava mahdollisimman suurta osaa sen käyttäjistä. Yksiselitteisesti ei voida määrittää, missä kohdin pitää esimerkiksi joustaa palvelutasosta; lopulliset päätökset nojaavat tiettyihin reunaehtoihin.

Aikatauluilta edellytetään myös joustavuutta, jotta liikenteen uudelleensuunnittelu onnistuu riittävän helposti (Mukula 2008). Oksasen mukaan aikataulusuunnittelulla kyetään ja pyritäänkin vaikuttamaan liikenteen täsmällisyyteen. Ankarat sääolosuhteet, onnettomuudet, vauriot ja tekniset ongelmat kuitenkin aiheuttavat rataverkolle häiriöitä, jotka heikentävät täsmällisyyttä.

Aikataulusuunnittelun perushaaste on löytää kullekin matkustajajunalinjalle sopivat saapumis- ja lähtöajat asemilla, huomioiden muun muassa turvallisuuden, liikenteenohjauksen, vaihtoyhteyksien ja liikenteen täsmällisyyden asettamat vaatimukset (Goverde 2005). Tavarajunaliikenteelle aikataulu vaikuttaa kuljetusaikaan ja kuljetusten toimitusvarmuuteen, yhteensopivuuteen ja joustavuuteen (Mukula 2008).

Aikatauluista on tullut aiempaa tiukempia ja aikataulusuunnittelun vaativuus on noussut

- asiakkaiden lisääntyneiden matka-ajan ja täsmällisyyden vaatimusten
- junamäärän, liikennesuoritteen ja nopeuserojen kasvun

- ajoaikojen lyhentämisen ja yhteyksien parantamisen takia. (Mukula 2008)

Ratakapasiteetin tehokas hyödyntäminen ilman rautatieliikenteen palvelutason heikkenemistä riippuu edellä mainituista tekijöistä (Mukula 2008). Kapasiteetin rajallisuus heikentää liikenteen täsmällisyyttä, junien ajoaikoja ja kaluston käytön tehokkuutta (RHK 2006). Nurkan mukaan sen kasvattaminen edellyttää investointien kustannusten ja niistä saatavien hyötyjen arviointia pitkällä tähtäimellä.

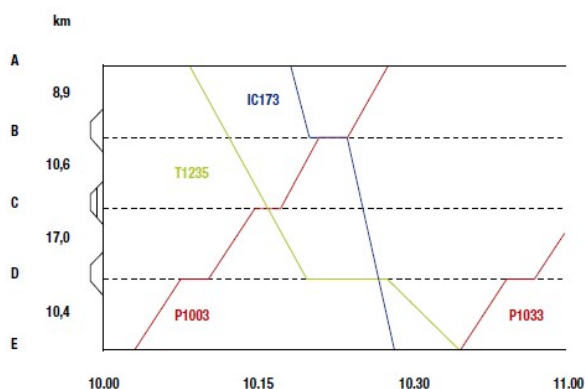
Ratatöiden ja kunnossapidon ratakapasiteettitarpeet lisäävät aikataulusuunnittelun haasteita. Niiden yhteensovittaminen liikenteen kanssa on oleellinen osa suunnittelua. Osa ratatöistä voidaan tehdä sopivina hetkinä liikennöinnin välillä, mutta tietyt niistä vaativat pidempiä työaikoja. Tällöin aikataulurakenteeseen täytyy tehdä muutoksia etenkin liikenteen täsmällisyysvaatimusten takia. (Mukula 2008)

Aikataulusuunnittelu vaikeutuu sen reunaehtojen määrän kasvaessa. Osan palvelutasotekijöistä kohdalla ei yleensä voida joustaa paljon, osa taas on huomioitava normaalia enemmän joissain tilanteissa. Joidenkin muutosten vaikutukset ovat yksiselitteisiä, mutta joillain on sekä hyödyllisiä että haitallisia vaikutuksia: tällöin on vaikea tunnistaa niistä merkittävämpi. Vaikeinta on muodostaa kvantitatiivinen yhteys palvelutasotekijöiden ja liikenteen täsmällisyyden välille. (Vromans 2005.)

2.3 Graafinen aikataulu

Rautatieliikenteen aikataulu esitetään yleensä graafisesti. Graafinen aikataulu havainnollistaa liikenteen kulun ja määrittää periaatteet radan varaamiselle junia varten. Suomessa vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla etäisyydet, mukaan lukien rataosan asemat. Junan kulku yksinkertaistetaan suoraksi viivaksi, vaikka junan nopeus todellisuudessa vaihtelee kyseisellä välillä. Viivan kaltevuus kuvaa keskinopeutta. Aikataulusta nähdään myös junakohtaukset ja -ohitukset, junien pysähdyskäyttötymiset ja -nopeuserot, junatiheys ja junavälit. (RHK 2007.) Myös matkustajien tarvitsemat vaihtoyhteydet ilmenevät aikataulusta (Schittenhelm 2008).

Kuvassa 2 on yksinkertainen esimerkki graafisesta aikataulusta. Siinä yksiraiteisella rataosalla asemien A ja E välillä lähijuna P1003 pysähtyy jokaisella asemalla ja kohtaa vastaantulevan kaukojunan IC173 asemalla B. Tavarajuna T1235 pysähtyy asemalla D päästääkseen nopeamman kaukojunan ohitseen. (RHK 2007)



Kuva 2. Graafinen aikataulu (RHK 2007).

2.4 Aikataulujen arviointi ja optimointi

2.4.1 Merkitys ja ongelmat

Aikataulun palvelutaso ja tehokkuus riippuvat pääasiassa

- junien ajo- ja pysähdysajoista
- aikataulutetusta odotusajasta
- riittävästä, muttei ylimitoitetuista pelivaroista ja puskuriajoista
- junavälien jakaumasta
- minimijunaväleistä
- junamäärästä
- aikataulurakenteesta
- aikataulun joustavuudesta. (Hansen 2010)

Aikatauluja voidaan arvioida ja optimoida eri menetelmillä edellä mainittuihin tekijöihin peilaten. Etenkin aikataulun häiriösietoisuuden tarkastelu on tärkeää. (Goverde 2005.) Aikataulusuunnittelun prioriteettien väliset ristiriidat ja palvelutasotekijöiden keskinäiset, rautatieliikenteen suljetusta luonteesta johtuvat riippuvuudet tekevät vaikeuttavat arviointia ja optimointia. (Mukula 2008)

Menetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: analyttisiin menetelmiin, liikenteen simulointiin ja tilastolliseen analyysiin. Jokaisella niistä on hyvät ja huonot puolensa; tutkimuksen tarkoitus sanelee menetelmän valintaa. Menetelmiä voidaan myös käyttää rinnakkain niiden hyvien ominaisuuksien yhdistämiseksi. (Mattsson 2004)

Aikatauluvaihtoehtojen erot voivat olla pieniä, mutta merkittäviä: suljetussa rautatiejärjestelmässä häiriöt leviävät herkästi (Goverde 2005). Lisäksi, aikataulujen paremmuusjärjestys ei anna tietoa optimaalisuudesta (Mukula 2008).

2.4.2 Analyttiset menetelmät

Analyttisissä menetelmissä mallinnetaan aineistoa matemaattisesti (Sipilä 2008). Tarkastelu voi ulottua esimerkiksi yksittäisen junan täsmällisyyteen tai keskimääräisiin sekundaarisiin viiveisiin. Ennustavat menetelmät käyttävät hyväkseen liikenteen täsmällisyystietoa. (Carey 1999.) Täsmällisyyttä on luonteensa takia kuitenkin vaikea mallintaa matemaattisesti: normaalisti juna ei voi esimerkiksi lähteä liikkeelle ennen aikataulunmukaista lähtöaikaa, vaikka järjestelmä olisi siihen valmis. (Carey 1999, Goverde 2005.)

Analyttiset menetelmät ovat usein matemaattisesti haastavia, mutta niiden käyttö on simulointia nopeampaa. Niissä ei voida kuitenkaan huomioida kaikkia liikenteen muuttujia, vaan on tehtävä yksinkertaistavia oletuksia. Osa menetelmistä ei tarvitse lähtötiedokseen aikataulua, mikä parantaa niiden sovellettavuutta. (Sipilä 2008)

Yksittäisten palvelutasotekijöiden määrittämiseen aikataulusta on olemassa joitain matemaattisesti helppotajuisia ja soveltuvuudeltaan hyviä menetelmiä. Niillä päästään esimerkiksi ratakapasiteetin käyttöasteen laskuissa riittävään tarkkuuteen. Niiden käyttäminen on lisäksi edullista. (Pachl 2002)

Moni aikataulujen optimointimenetelmistä minimoi junien pysähdysaikoja ja matkustajien matka-aikoja, mikä ei ole häiriöiden hallinnan kannalta optimaalista. (Mukula 2008.) Monet puolestaan laskevat sekundaaristen viiveiden odotusarvon junamäärän, junavälien ja jonoteorian perusteella (Goverde 2005). Menetelmät eivät optimoi monen palvelutasotekijän suhteen eivätkä yleensä ota kattavasti huomioon optimoinnin vaikutuksia muihin palvelutasotekijöihin (Mukula 2008).

Goverden (1998) menetelmä huomioi junien vaihtoaikojen ja saapumisviiveiden vaikutuksen liikenteen täsmällisyyteen vakioaikataulun optimoinnissa. Petersin (2003) menetelmä optimoi vakioaikataulua niin, että matka-ajalla, häiriösietoisuudella ja kalustokierrolla on tietyt hyväksytyt raja-arvot. Vromansin (2005) menetelmä optimoi vakioaikataulua keskimääräisten viiveiden perusteella, asettaen hyväksytyt raja-arvot junien ajoajoille, pelivarjoille ja puskurijaoille sekä pysähdys- ja vaihtojaoille ja niiden pelivarjoille. Viiveitä painotetaan suhteessa ajoaikaan ja niitä molempia myös suhteessa itseensä: junille annetaan painoarvo matkustajamäärien perusteella. Menetelmillä on mahdollista parantaa aikataulun häiriösietoisuutta merkittävästi.

Viiveiden vähentämiseksi ja niistä palautumisen nopeuttamiseksi on erityisen tärkeä kehittää menetelmiä, joilla voidaan määrittää sopivat pelivarat ja puskurijat sekä niiden optimaalinen jakaminen matkan osille. Aikataulun palvelutason arvioinnissa voitaisiin tarkastella etenkin häiriösietoisuutta, ratakapasiteetin käyttöastetta, pelivaran määrää ja jakoa sekä opastinvälin varausaikoja. (Hansen ja Pacht 2008)

2.4.3 Rautatieliikenteen simulointi

Simulointiohjelmissa on hyviä ominaisuuksia aikataulusuunnitteluun ja liikenteen hallintaan (Hansen ja Pacht 2008). Simuloinnit perustuvat usein analyttisiin malleihin; tietokoneiden laskentateho mahdollistaa useiden monimutkaisten yhtälöiden ja rinnakkaistapahtumien laskemisen. (Carey et al. 2005.) Simulointia käytetään yleensä silloin, kun tutkiminen empiirisillä ja analyttisillä menetelmillä on hyvin vaikeaa eikä niillä saatava keskiarvotieto riitä (Hofman ja Madsen 2005).

Aikatauluvaihtoehtoja voidaan verrata monipuolisesti simuloinnin avulla. Simuloinneilla saadaan esimerkiksi aikataulujen häiriösietoisuudesta tunnuslukuja, joiden perusteella aikataulut voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen. Simulointi on ainoa menetelmä, jolla voidaan tutkia rautatieliikenteen toimintoja käytännön kokeiden ollessa mahdottomia. (Musto 2008.)

Simuloinneilla ei saada suoraan matemaattisia ratkaisuja, vaan analysointi tapahtuu seuraamalla mallin toimintaa ja tilastoimalla tuloksia (Hofman ja Madsen 2005). Simulointi on käyttökelpoisen menetelmä aikataulujen ja liikenteen täsmällisyyden arviointiin, mutta Suomessa simulointia on hyödynnetty vähän (Mukula 2008).

Simulointi auttaa ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamista: aikatauluvaihtoehtoja voidaan vertailla eri häiriötilanteissa, perustuen esimerkiksi keskimääräisiin viiveisiin. Aikatauluista voidaan myös valita junat, jotka ovat eri häiriötilanteissa täsmällisimpiä ja muodostaa niistä kokonaan uusi aikataulu. Uutta aikataulua pitää myös tutkia vastaavilla häiriöillä vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi. (Musto 2008)

Simuloinneissa lähtötiedoilla on suuri vaikutus tulosten tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Simulointimallin rakentamiseen tarvitaan yksityiskohtaista ja luotettavaa tietoa monista tekijöistä. (Mukula 2008.) Keskeisintä on varmistaa mallin täsmävyys todellisen liikenteen kanssa ennen varsinaisia tutkimuksia. Täsmävyys edellyttää mallin kalibrointia, jossa hyödynnetään empiirisiä tutkimuksia sekä ratainfrastruktuurin ja kaluston fysikaalisia ominaisuuksia. (Hansen ja Pacht 2008.)

2.4.4 Tilastollinen analyysi ja liikenteen täsmällisyys

Tilastollinen analyysi tarkastelee lähinnä liikenteen täsmällisyystietoa. Empiirinen tutkimusaineisto sisältää tietoa liikenteen satunnaistapahtumien aikavaihteluista ja junien keskinäisistä vuorovaikutuksista. (Goverde et al. 2001.) Täsmällisyystutkimuksissa yleinen minuutin tarkkuus ei riitä yksityiskohtaiseen analyysiin, joka edellyttää kymmenen sekunnin tarkkuutta (Goverde 2005).

Liikenteen täsmällisyyden tarkka määritelmä on prosenttiosuus junista, jotka saapuvat tiettyyn paikkaan tai ohittavat sen niin, että niiden viive alittaa hyväksytyn minuuttimäärän (Hansen 2001, Olsson ja Haugland 2004, Salkonen et al. 2009). Yleensä aikataulupoikkeamat noudattavat normaali jakaumaa, jonka painopiste on negatiivisen poikkeaman puolella (Skagestad 2004).

Pääteasemien täsmällisyys kätkee tietoa täsmällisyydestä koko matkan ajalta (Andersson et al. 2011): on mahdollista, että useimmilla asemilla myöhässä ollut juna on kirinyt viiveen kiinni ennen määränpäättään (Salkonen 2008) – yleensä täsmällisyys paraneekin pääteasemaa lähestyttäessä (Olsson ja Haugland 2004). Lisäksi, matkustajavirratt eivät usein jakaannu tasaisesti erityisesti pitkillä yhteysväleillä, mikä lisää tarvetta tarkastella täsmällisyyttä väliasemilla. (Olsson ja Haugland 2004, Salkonen 2008.)

Täsmällisyyden mittaaminen voi olla joko absoluuttista (myöhästymisminuutit, myöhästymisten määrä) tai suhteellista. Suhteellisesti mitattaessa myöhästymisiä peilataan suoritteeseen (matkustajakilometrit, junan ajoaika, pysähdysten lukumäärä). (Salkonen 2008.) Se antaa paremman käsityksen myöhästymisten haitoista (Vromans 2005). Ajoajalla painotettaessa nopeat junat saavat huonomman täsmällisyyden kuin saman verran myöhässä olevat hitaat junat. Junakilometreillä painotettaessa junien nopeusero ei vaikuta täsmällisyyteen. (Mukula 2008.)

Pelkkä myöhästymisten keskiarvojen tarkastelu kätkee tietoa, minkä takia on myös hyvä tarkastella niiden ja junien ajoaikojen jakaumia ja hajontoja. (Skagestad 2004.) Lisäksi, eri junatyypeillä ja rataosilla on erilaiset täsmällisyystasot: täsmällisyyttä pitäisi tarkastella niidenkin perusteella (Goverde 2005, Liikennevirasto 2010b).

3 AIKATAULUN PALVELUTASOTEKIJÄT

3.1 Rautatieliikenteen aikataulun palvelutaso ja sen tekijät

Rautatieliikenteen aikataulun kvantitatiivinen tai tekninen laatu tarkoittaa kahta asiaa: junien mahdollisuutta pysyä suunnitellussa aikataulussa tai liikenteen toteutumaa suunnitelmaan nähden eli täsmällisyyttä. Laadun tekijät vaikuttavat toisiinsa, jolloin yhden tekijän arvon muuttaminen näkyy myös muiden tekijöiden arvoissa. (Mäkitalo 2001)

Tässä työssä aikataulun laadun eli palvelutason käsitetään muodostuvan teknisen laadun lisäksi siitä, miten se toteuttaa kokonaisuudessaan kaikkia ennalta määritettyjä palvelutasotavoitteita. Palvelutason tekijöistä puhutaan palvelutasotekijöinä. Ne esitellään seuraavassa järjestyksessä:

- häiriösietoisuus
- junan ajoaika osatekijöineen
- junamäärä
- junaväli
- junien nopeusero
- liikenteen heterogeenisuus
- junien lisäämismahdollisuus
- ratakapasiteetin käyttöaste
- aikataulurakenne (vuoroväli ja aikataulun säännöllisyys)
- vaihtoyhteydet
- kalustokierto.

3.2 Häiriösietoisuus

3.2.1 Aikataulun häiriösietoisuus

Aikataulun häiriösietoisuus kuvaa paljonko mahdolliset häiriöt aiheuttavat liikenteelle viiveitä ja niiden ketjuuntumista sekä kuinka hyvin liikenne palautuu niistä normaaliin tilaan (Vromans 2005). Hyvä häiriösietoisuus estää lievien häiriöiden vaikutukset liikenteeseen. Häiriöiden voimakkuus riippuu niiden sijainnista, suuruudesta, laajuudesta, määrästä ja aikataulun häiriösietoisuudesta. Viiveet ketjuuntuvat junien riippuvuuksien takia. Ketjuuntumiseen vaikuttaa myös ratakapasiteetin käyttöaste ja kalustokierto. (Mukula 2008.) Häiriösietoisuutta ei ole mahdollista määrittää monipuolisesti käyttämällä vain yhtä täsmällisyysmittaria (Andersson et al. 2011).

Rataverkon häiriöherkkiä kohteita ovat

- risteysasemien tai muuten ruuhkaisten asemien läheiset rataosat
- korkean ratakapasiteetin käyttöasteen rataosat
- asemat, joissa matkustajien poistuminen junista ja juniin nouseminen on hidasta
- ratapihat. (Sipilä 2008)

Aikataulun häiriösietoisuus korreloi voimakkaasti täsmällisyyden kanssa (Vromans 2005). Häiriösietoisuuteen vaikuttavat

- aikataulun ominaisuudet
- ratakapasiteetin käyttöaste

- matkustajien määrä
- junavaunujen kuormitusaste (matkustajaa/istuinpaikkojen lukumäärä)
- junavuorojen peruutukset
- kaluston laatu, kunto ja huolto
- tilapäiset nopeusrajoitukset
- junien etusijajärjestys
- ratatyöt
- sääolot. (Olsson ja Haugland 2004)

Näistä ratakapasiteetin käyttöasteen, matkustajien määrän, junavaunujen kuormitusasteen, junavuorojen peruutuksien ja nopeusrajoitusten kasvaessa täsmällisyys heikkenee. Merkittävin matkustajien vaikutuksista on poistuminen junasta ja junaan nouseminen sekä niihin käytetty aika. (Olsson ja Haugland 2004.)

Aikataulun häiriösietoisuutta voidaan tilanteesta riippuen parantaa

- tasaamalla junien nopeuksia
- siirtämällä junavaroja ruuhka-ajalta hiljaisemmille tunneille
- pitämällä junat eri raiteilla niiden nopeuksien perusteella
- lyhentämällä junien pysähdysaikoja
- lisäämällä junaohituksia
- lisäämällä kriittisiin vaihtoyhteyksiin pelivaraa
- hylkäämällä vakioaikataulurakenne
- asettamalla häiriösietoisuuden kannalta tärkeimpiä junia etusijalle
- vähentämällä junatarjontaa. (Yuan ja Hansen 2007, Liikennevirasto 2010c)

3.2.2 Matkustajien häiriösietoisuus

Dewilden et al. (2011) menetelmä määrittää aikataulun häiriösietoisuuden matkustajien kannalta, keskittyen junien sijaan matkustajien kokemiin viiveisiin. Belgian rautatieviranomaisen Infrabel on ottanut sen käyttöönsä uusien aikataulujen luomiseen. Menetelmä toimivuus on todennettu, mutta sen käyttö edellyttää matkustajalaskentoja ja primaaristen viiveiden tarkkaa arviointia. Häiriösietoinen aikataulu vaimentaa lyhyet viiveet ja minimoi matkustajien todellisen matka-ajan; sekundaarisia viiveitä on kohtuullisesti ja niistä palautuminen riittävän nopeaa. Todellinen matka-aika sisältää viiveiden lisäksi mahdollisesti menetetyt vaihtoyhteydet ja peruutetut junavuorot.

Matkustajien näkökulmasta tarpeeton odotusaika huomioidaan menetelmässä antamalla painoarvot matka-ajan erilaisille pidennyksille, joita ovat junan pelivara, vaihtoajan puskuriaika ja viive. Pelivaran ja vaihtoajan puskuriajan kohdalla erotetaan toisistaan hyödynnetty ja hyödyntämätön aika.

Taulukossa 1 on esitetty painoarvot matka-ajan pidennyksille ja ylimääräisen odotusajan kustannus *PEWC* (Perceived ExtraWaiting Cost per Passenger Type), pohjautuen laajoihin odotusajan arvon tutkimuksiin. Siinä S_n tarkoittaa käyttämätöntä pelivaraa, B_n käyttämätöntä vaihtoajan puskuriaikaa, D viivettä ja pax matkustajien määrää. Perutun junavuoron tai menetetyt vaihtoyhteydet tekijä 900 (sekuntia) perustuu Belgian rautatieliikenteen ruuhka-ajan vuoroväleihin ja vaihtoehtoisten junalinjojen vähäisyyteen. Sen arvoa pitää pienentää vaihtoehtoisten junalinjojen määrän kasvun mukaan.

Taulukko 1. Matka-ajan pidennystekijöiden painoarvot ja ylimääräisen odotusajan kustannus (PEWC) (Dewilde et al. 2011)

Matka-ajan pidennystekijä	Painoarvo	PEWC (s/pax)
Käyttämätön pelivara tai puskuriaika	1	$1 \cdot S_n $ tai $1 \cdot B_n $
Viive	2	$2 \cdot D $
Junavuoron peruutukset tai menetetyt vaihtoyhteydet	2	$2 \cdot 900$

Taulukosta 2 nähdään, ettei *PEWC* ole kaikille matkustajille sama. Matkustajat voidaan jakaa neljään ryhmään sen perusteella, mitä toimintavaihtoehtoja heillä on junan asemalle saapumisen jälkeen. Taulukossa esitetään myös matkustajien toimintavaihtoehdot ja niiden mahdollisen ylimääräisen odotusajan kustannuksen syyt.

Taulukko 2. Matkustajien toimintavaihtoehdot ja niiden mahdollisen ylimääräisen odotusajan kustannuksen (PEWC) syyt (Dewilde et al. 2011)

Toimintavaihtoehto	PEWC:n syy
Pysähdys	pelivara, pysähdysajan pelivara, junavuoron peruutus
Junaan nouseminen	junavuoron peruutus
Junasta poistuminen	pelivara, viive
Junavaihto	pelivara, vaihtoajan puskuriaika, menetetty vaihtoyhteys

Aikataulun häiriösietoisuus R^n lasketaan kaavalla 1: Sen arvon pienentyessä häiriösietoisuus paranee.

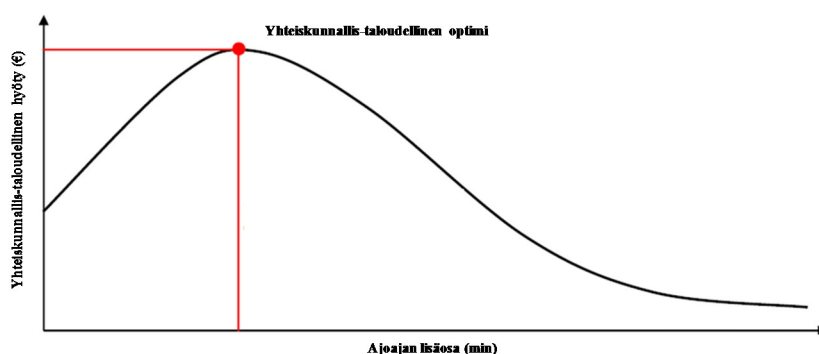
$$R^n = \frac{T_{pr} + PEWC}{T_{pn}}, \text{ jossa} \quad (1)$$

T_{pr} on matkustajien yhteenlaskettu todellinen matka-aika

T_{pn} on matkustajien yhteenlaskettu aikataulunmukainen matka-aika

R^n ja keskimääräinen viive pienenevät pelivaran ja puskuriajan eli ajoajan lisäosan kasvaessa tietyn määrän. Sen kasvaessa lisää, aiheutuu matkustajille liikaa tarpeetonta odotusaikaa ja R^n alkaa kasvaa, vaikka keskimääräinen viive jatkaisi pienenemistään.

Kuva 3 esittää aikataulun yhteiskunnallis-taloudellinen hyödyn riippuvuutta ajoajan lisäosasta. Yhteiskunnallis-taloudellisen hyödyn optimi saavutetaan, kun ajoajan lisäosan määrä on kohtuullinen. Tällöin liikenteen luotettavuus ja matkustajien tarpeeton odotusaika ovat tasapainossa. (Landex 2008.)



Kuva 3. Aikataulun yhteiskuntataloudellisen hyödyn riippuvuus ajoajan lisäosasta (Landex 2008).

3.3 Junan ajoaika osatekijöineen

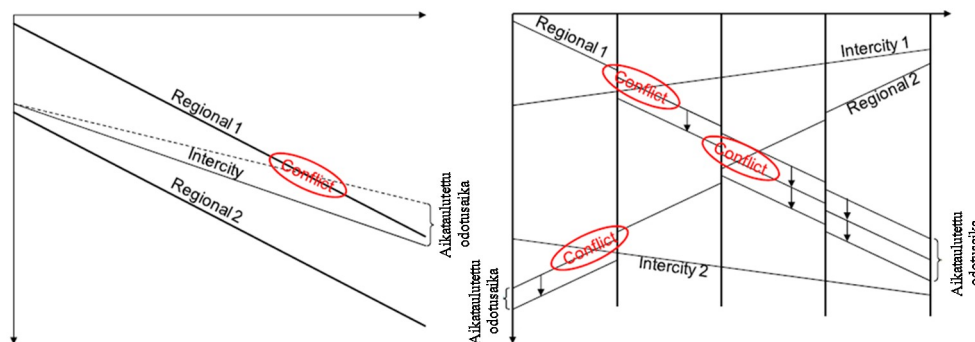
3.3.1 Junan ajoajan muodostuminen

Junan ajoaika tarkoittaa todellista kestoja junan kululle kahden paikan välillä. Se muodostuu teoreettisesta ajoajasta, asemilla pysähdyksistä, pelivarasta, odotuksista ja viiveestä (kuva 4) (Sipilä 2008).

Teoreettinen ajoaika	Asemilla pysähdykset	Pelivara	Odotukset (kohtaamiset ja ohitukset)	Viive
Ajoaika				
Aikataulunmukainen ajoaika				
Minimijaoaika				

Kuva 4. Junan ajoajan osatekijät.

Junien aikatauluviivojen yhteensovittamisen takia junan ajoaikaan on usein lisättävä aikataulutettua odotusaikaa, joka johtuu junien välisistä riippuvuuksista (kuva 5) (Landex 2008): junaa on hidastettava (kuvassa vasemmalla) tai odotusaikojia on kasvatettava (kuvassa oikealla).



Kuva 5. Aikataulutettu odotusaika yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).

Aikataulutettu odotusaika ei ole joustava, joten sitä ei voida pelivaran ja puskuriajan tavoin käyttää viiveiden hallintaan. (Goverde 2005, Landex 2008.) Sen ei suurimmillaan pitäisi olla enempää kuin 15–20 prosenttia junien ajoajoista (Kaas 1998). Jos aikataulussa on paljon odotusaikaa, osa siitä voidaan käyttää nopeiden junien ylimääräisiin pysähdyksiin asemilla. Jotta tämä olisi järkevää, matkustajakysynnän on oltava riittävän suuri uusilla pysähdysasemilla. Junan ajoajan kasvun takia vastaavan junalinjan vuoroväli saattaa pidentyä tai junakaluston ja henkilöstön tarve kasvaa pitenemisen ehkäisemiseksi. (Landex 2008.)

Tavarajunayritys DB Schenker Rail Scandinavian mukaan tavarajunaliikenteen junilla pitäisi olla mahdollisimman vähän aikataulutettua odotusaikaa, jotta ne olisivat kilpailukykyisiä maantiekuljetusten kanssa (Schittenhelm 2011).

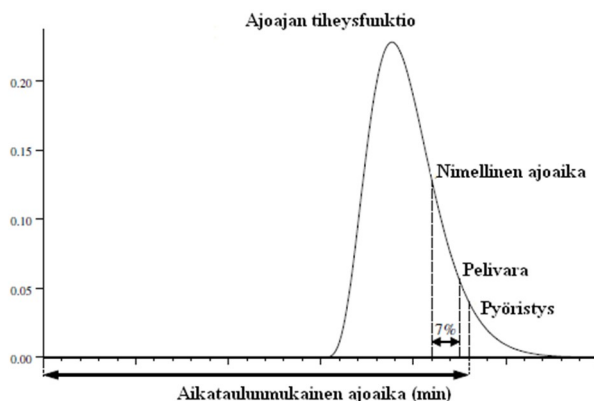
3.3.2 Teoreettinen, minimi- ja aikataulunmukainen ajoaika

Teoreettinen ajoaika tarkoittaa kestoa junan kululle kahden paikan välillä optimiolosuhteissa ilman pysähdyksiä (Sipilä 2008). Sen määrittäminen edellyttää muun muassa seuraavien tekijöiden huomioimista:

- ratageometriasta ja -infrastruktuurista aiheutuvat nopeusrajoitukset
- junan paino ja kiihtyvyysominaisuudet
- junakaluston ja kuljetettavan rahdin asettamat rajoitteet
- vetokaluston voima. (Mukula 2008)

Minimijaoaika tarkoittaa kestoa junan häiriöttömälle kululle kahden paikan välillä. Se koostuu teoreettisesta ajoajasta, asemilla pysähdyksistä ja pelivarasta. (Sipilä 2008.) Oksasen mukaan minimijaoaika voidaan määrittää simuloinneilla, mutta on suositeltavaa varmistaa se koeajolla.

Aikataulunmukainen ajoaika koostuu junan minimijaoajasta sekä odotuksiin kuuluvista kohtaamisista ja ohituksista (Sipilä 2008). Kuva 6 esittää, miten se määritetään. Ensin nimellinen ajoaika lasketaan teoreettisen ajoajan perusteella. Siihen lisätään pelivara ja saatu tulos pyöristetään seuraavaan minuuttiin. Ajoajan tiheysfunktio kuvaa junien ajoaikojen jakautumista. (Goverde 2005.)



Kuva 6. Aikataulunmukaisen ajoajan määrittäminen (Goverde 2005).

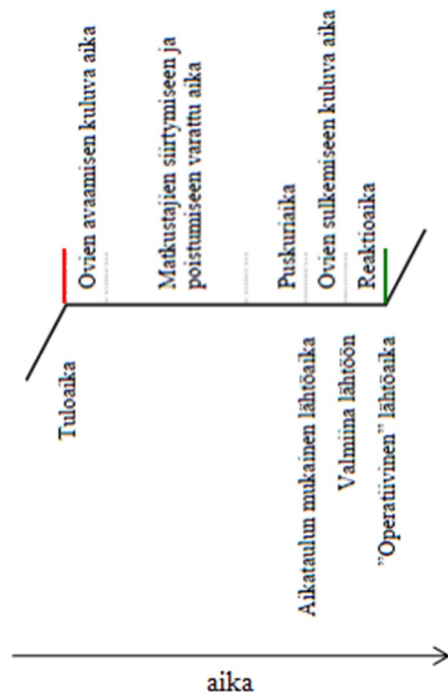
Mannerströmin mukaan "junien on kuljettava vain niin nopeasti kuin tarpeellista". Helanderin mukaan Suomessa nopeiden kaukojunien aikataulunmukainen ajoaika mitoitetaan muun muassa liikenteen homogeenisuuden lisäämiseksi usein selkeästi pienemmäksi kuin mitä junat saisivat ajaa. Tällöin junan ajonopeutta voidaan tarvittaessa myös lisätä, mikä nopeuttaa viiveistä palautumista. Matkustajat eivät kuitenkaan usein ymmärrä, miksi nopean kaukojunan ajoaika ei ole juurikaan tavallista kaukojunaa lyhyempi eivätkä ole tietoisia tästä aiheutuvista myönteisistä vaikutuksista täsmällisyyteen ja vaihtoyhteyksien luotettavuuteen.

3.3.3 Asemilla pysähdykset

Asemilla pysähdykset koostuvat junan pysähdysajasta, vaihtoajasta ja kääntöajasta. **Pysähdysaika** tarvitaan matkustajien poistumiseen junasta ja junaan nousemiseen. Siihen voi sisältyä myös pelivara, jolla varaudutaan junan saapumisviiveeseen ja vaihteluihin ajassa, joka matkustajilta kuluu junasta poistumiseen ja junaan

nousemiseen. Lyhyt pysähdysaika lisää viiveiden riskiä, pitkä pysähdysaika kasvattaa matka-aikaa ja varaa ratakapasiteettia asemilla. (Goverde 2005.)

Pysähdysaika riippuu yleensä junatyypistä, junan pituudesta ja asemasta, mutta suurilla asemilla pitkälti matkustajamääristä (Goverde 2005). Kuvassa 7 on esitetty pysähdysajan osatekijät aikajanalla.



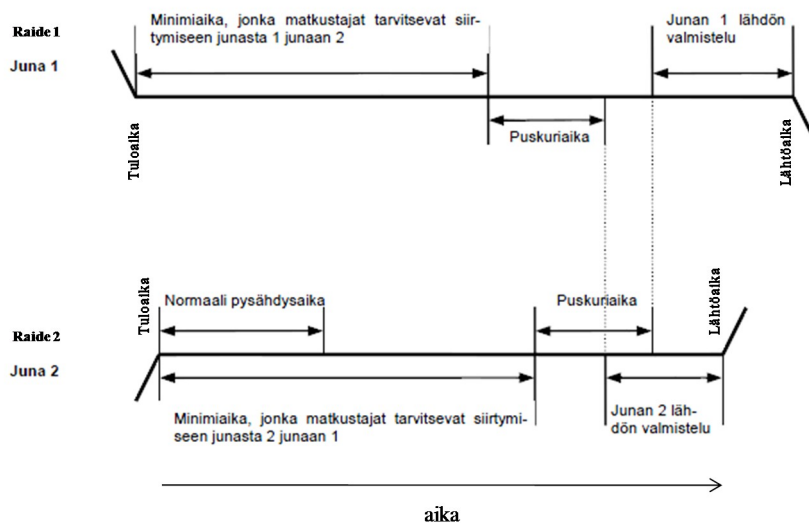
Kuva 7. Pysähdysajan osatekijät (Goverde 2005).

Olssonin ja Hauglandin (2004) mukaan ruotsalaisessa tutkimuksessa havaittiin pysähdysaikojen kasvattamisen muutamalla minuutilla saattavan edellyttää kohtaus- ja ohituspaikkojen siirtämistä. Lisäksi, ajoaikoja täytyi kasvattaa jopa 7 prosenttia junien välisten riippuvuuksien takia. Hollantilaisten tutkimusten mukaan liian pitkät pysähdysajat johtavat usein junien lähtöviiveisiin (Hansen 2010). Matkustajamäärien vaihtelu lisää pysähdysaikojen hajontaa ja heikentää liikenteen luotettavuutta (Goverde 2005).

Vaihtoajalla mahdollistetaan vaihtoyhteyksien toimiminen (Pachl 2002). Se sisältää junasta poistumisajan, kävelyajan ja junaan nousemisajan. Sen pituus riippuu matkustajamääristä ja -tiheyksistä, aseman tiloista ja mittasuhteista sekä kävelynopeuksista. (Goverde 2005.) Vaihtoajan pituuteen vaikuttaa myös junien raiteidenkäyttö: jos lähtevä juna ei käytä saapuvaan junaan nähden viereistä raidetta, matkustaja joutuu vaihtamaan laituria (Schittenhelm 2008).

Vaihtoajan ollessa liian pitkä, kasvaa matkustajien matka-aika ja liikenteen palvelutaso laskee; liian lyhyt vaihtoaika heikentää aikataulun luotettavuutta. Myös vaihtoaikoihin voidaan lisätä puskurikaikaa myöhässä olevan junan aiheuttamasta viiveestä palautumiseen lähtevän junan myöhästymisen estämiseksi. Sen määrä voi perustua esimerkiksi vaihtoyhteyden tärkeyteen tai myöhästymisjakaumaan. (Pachl 2002.) Monet yhtäaikaiset vaihtoyhteyksiin riippuvuudet asemilla lisäävät viiveiden riskiä (Schittenhelm

2008). Aikataulusuunnittelussa matka-aikaan voidaan vaikuttaa pysähdys- ja vaihtoaajoilla vain rajallisesti, koska muutkin reunaehdot ohjaavat suunnittelua (Peeters 2003). Kuvassa 8 on esitetty aikajanalla, miten junien välinen vaihtoyhteys toteutetaan.



Kuva 8. Kahden junan välisen vaihtoyhteyden toteuttaminen (Landex et al. 2006).

Landex et al. (2006) mukaan vaihtoyhteyden toteuttamisessa etusijajärjestyksessä korkeamman prioriteetin junan pysähdysaika saadaan lyhyemmäksi, kun alemman prioriteetin juna saapuu asemalle hieman aikaisemmin. Saman prioriteetin junien saapumisjärjestys voidaan päättää esimerkiksi matkustajamäärien perusteella.

Tanskalainen rautatieyritys DSB laskee keskimääräisen vaihtoajan asemilla kaavalla 2 (Schittenhelm 2011).

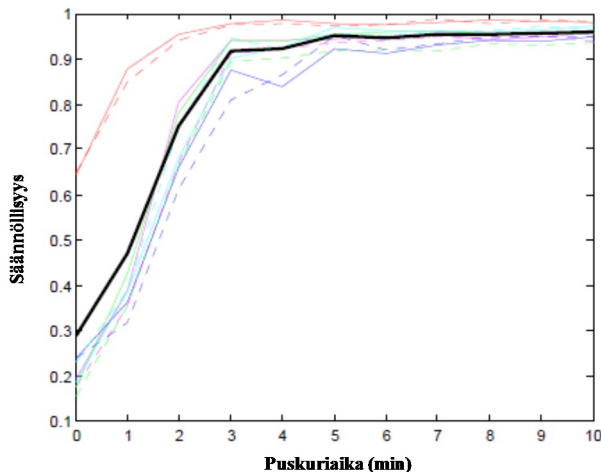
$$T_t = \frac{T_{1-2}}{2} \times \frac{T_{1-2}}{I_p} + \dots + \frac{T_{x-1}}{2} \times \frac{T_{x-1}}{I_p}, \text{ jossa} \quad (2)$$

T_t on keskimääräinen vaihto aika asemalla
 T_{1-2} on junien 1 ja 2 aikaväli
 T_{x-1} on junan x ja aikataulun seuraavan jakson ensimmäisen junan aikaväli
 I_p on aikataulun jaksonpituus

Saavuttuaan pääteasemalle, juna yleensä kääntyy ja jatkaa matkaansa vastakkaiseen suuntaan. **Kääntöaika** tarkoittaa aikaa, jonka juna viettää pääteasemalla ennen matkansa jatkamista. Se koostuu muun muassa erilaisista tarkastuksista, siivouksista ja vaihtotyöstä. Vaihtotyöt pitäisi suunnitella siten, että vilkkaimmin liikennöidyillä raiteilla ajetaan mahdollisimman vähän. (Mukula 2008.) Minimikääntöaika riippuu junatyypistä ja vaihtotyömahdollisuuksista. Oksasen mukaan Suomen lähijunaliikenteessä junien kääntöajan käytännönminimi on 6 minuuttia. Lyhyin kääntöaika on junilla, joiden molemmissa päissä on ohjausyksikkö. (Mukula 2008.) Suomessa ei ole käytössä ohjausyksiköjä.

Kääntöaikoihinkin on tärkeää lisätä puskuriaikaa viiveiden ketjuuntumisen ehkäisemiseksi. Puskuriajan pitää kuitenkin olla riittävän tiukka, koska kääntöajan kasvattaminen lisää kalustotarvetta, varaa laiturikapasiteettia ja nostaa

liikennöintikustannuksia. Kuva 9 esittää liikenteen säännöllisyyden riippuvuutta pääteasemille lisättävästä puskuriajasta, pohjautuen simulointitutkimukseen. Simuloinnit tehtiin monille aikatauluille, jotka erosivat muun muassa puskuriajoiltaan, junamääriltään ja kalustokierroiltaan. Lisäämällä puskuriaikaa tiettyyn raja-arvoon asti, voidaan parantaa liikenteen säännöllisyyttä merkittävästi. Raja-arvon ylittymisen jälkeen puskuriajan lisäämisellä on hyvin pieni merkitys säännöllisyydelle. (Hofman ja Madsen 2005)

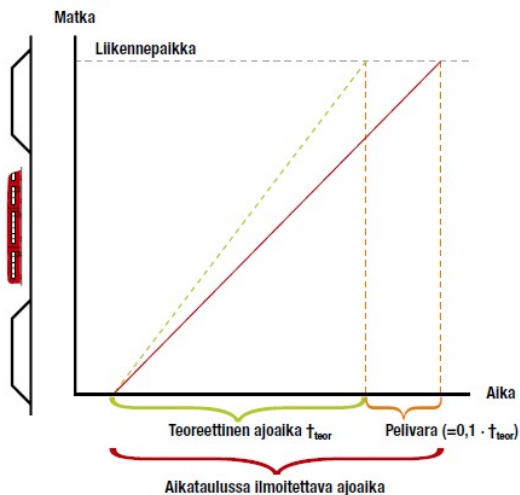


Kuva 9. Pääteasemille lisättävän kääntöajan puskuriajan vaikutus liikenteen säännöllisyyteen (värilliset viivat kuvaavat yksittäisiä linjoja, musta viiva junalinjojen keskiarvoa) (Hofman ja Madsen 2005).

3.3.4 Pelivara

Junan kulkuun vaikuttaa ja tuo epävarmuutta monia satunnaistekijöitä, kuten sääolosuhteet, kuljettajan ajokäyttäytyminen ja erilaiset rataverkolla tapahtuvat häiriöt. (RHK 2007.) Häiriöistä aiheutuvien viiveiden määrä riippuu voimakkaasti aikataulusta, ratakapasiteetin käyttöasteesta ja junien välisistä riippuvuuksista. Tiukka aikataulu ja pienet junavälit johtavat herkästi viiveiden ketjuuntumiseen (Mukula 2008). Teoreettiseen ajoaikaan lisätään pelivaraa, jotta junalla on mahdollisuus pysyä aikataulussa matkalla sattuneesta häiriöstä huolimatta. Se parantaa aikataulun häiriösietoisuutta ja junien kulun ennustettavuutta (RHK 2007).

Pelivara ilmaisee, kuinka paljon juna voi ajaa myöhässä (Mäkitalo 2001). Se kattaa ajan vaihtelut, joiden laskemiseksi ei ole yksiselitteistä kaavaa (Sipilä 2008). Pelivara määritetään matkan pituuden ja matka-ajan perusteella (RHK 2007). Sen suuruus on maakohtainen, yleensä 5–10 prosenttia teoreettisesta ajoajasta (Hovi ja Oksanen 2007). Poikkeavien olosuhteiden takia voidaan lisätä ylimääräistä pelivaraa. (RHK 2007.) Kansainvälinen rautatieliitto UIC suosittelee pelivaraa lisättävän ajoaikaan matkan pituuteen ja teoreettiseen ajoaikaan perustuvien pelivarojen summan verran. Nopeilla ja raskailla junilla pelivaraa tulisi olla enemmän. (UIC 2000.) Kuva 10 esittää, miten Suomessa pelivara (10 %) lisätään junan teoreettiseen ajoaikaan aikataulussa.



Kuva 10. Pelivaran lisääminen teoreettiseen ajoaikaan aikataulussa (RHK 2007).

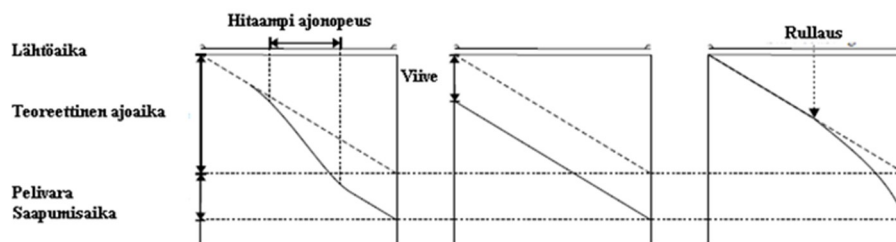
Pelivaran lisäämisen käänköpuolena junien ajoajat pitenevät ja ratakapasiteetin hyödyntäminen heikkenee. Pelivaraa tulee lisätä varovaisesti, eikä sitä usein edes ole mahdollista lisätä haluttua määrää junien välisten riippuvuuksien takia (Vromans 2005). Suuri pelivara saattaa myös antaa väärän kuvan liikenteen sujuvuudesta: juna voi olla täsmällisyysrajojen mukaan ajoissa pääteasemalla, vaikka olisi kokenut väliasemilla merkittäviä viiveitä (Mukula 2008). Pelivaran lisääminen ei aina paranna täsmällisyyttä, koska toiminnalle (tässä tapauksessa junan ajamiselle) annetun ajan kasvattaminen lisää itse toiminnan kestoa ihmiselle ominaisen käyttäytymispiirteen takia (Carey 1998).

Useissa maissa pelivara jaetaan tasaisesti koko matkalle, mikä ei johda junien pienimpään keskimääräiseen viiveeseen. Matkan alussa, jolloin viiveen kertyminen on vähäistä, pelivaraa on oltava vähemmän, jottei se mene hukkaan. Toisaalta, pelivaran jakaminen matkan alkuosalle heijastuu useampien asemien täsmällisyyteen. Loppuosalle jaettu pelivara vähentää myöhästymisiä ainoastaan loppuosan asemilla. (Vromans 2005.) Oksasen mukaan pelivaraa ei voida lisätä viimeisille liikennepaikkaväleille liityntäliikenteen huomioivilla rataosilla, koska junien pitää olla täsmällisiä myös väliasemilla.

Viiveiden vähentämiseksi pelivaraa kannattaa jakaa suhteessa enemmän

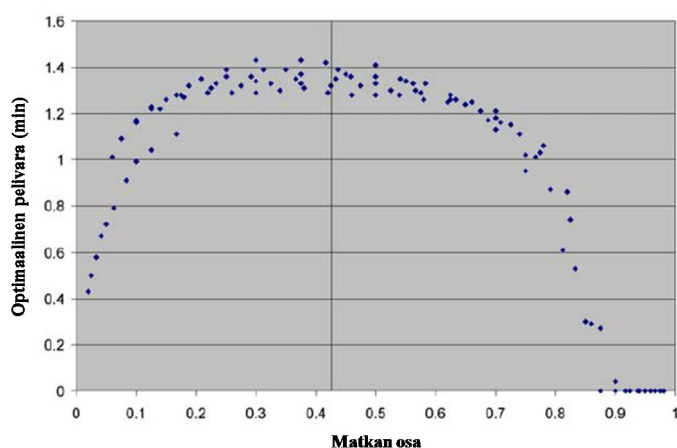
- junille, joiden matkustajamäärät ovat suuret
- rataosille, jotka ovat juuri ennen risteysasemia
- pitkille rataosille, joissa useat junat kohtaavat
- tiheästi liikennöidyille rataosille, joissa sekundaaristen viiveiden riski on suuri
- rataosille, joissa ratakapasiteetin käyttöaste on korkea
- rataosille, joissa häiriöitä esiintyy keskimääräistä enemmän
- ruuhka-ajalle. (Vromans 2005)

Kuva 11 esittää, miten pelivara voidaan käyttää. Juna voi a) ajaa eri syiden takia hitaammin (vasemmanpuoleinen kuva), b) lähteä asemalta myöhässä (keskimäinen kuva) ja c) vähentää energiankulutustaan käyttämällä jäljellä olevan pelivaran rullaamiseen (oikeanpuoleinen kuva). (Goverde 2005)



Kuva 11. Pelivaran käyttämisen vaihtoehdot (Goverde 2005).

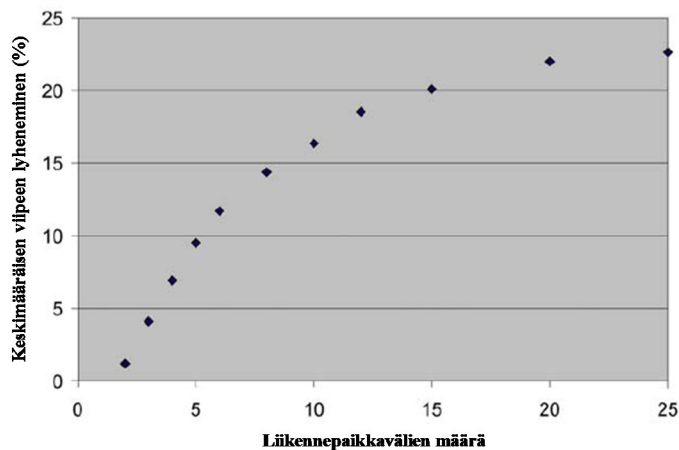
Vromans (2005) tutki pelivaran optimaalista jakamista ja sen vaikutuksia. Kuva 12 esittää, miten pelivara jaetaan optimaalisesti matkan osille. Tutkimustapausten välillä oli eroa niiden liikennepaikkavälien määrissä. Kuvan pisteet on piirretty kaikista tutkituista tapauksista.



Kuva 12. Pelivaran optimaalinen jakaminen matkan osille (Vromans 2005).

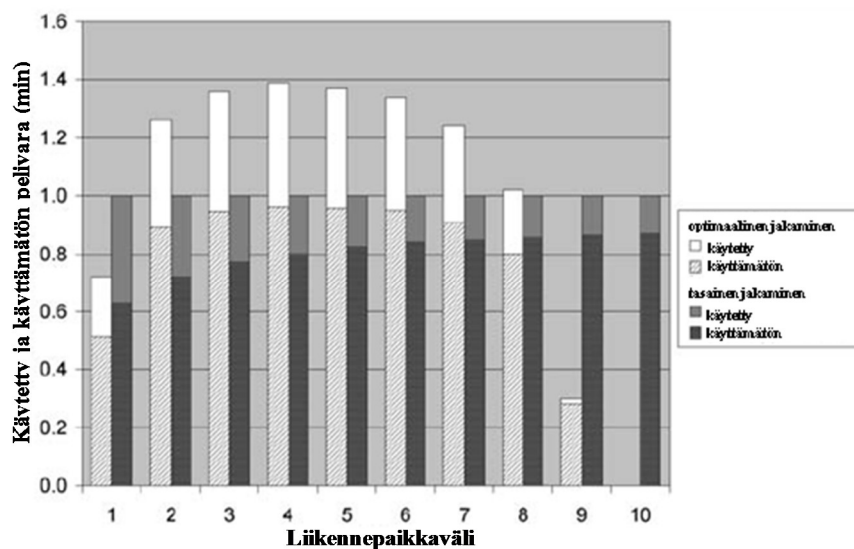
Pelivaran määrän pitää olla ensimmäisillä ja etenkin viimeisillä liikennepaikkaväleillä keskimääräistä pienempi. Viive mitataan kaikilla matkan osilla, minkä takia sen lyheneminen matkan alkupuolella saa suuremman painoarvon kuin matkan loppupuolella tapahtuva lyheneminen. Toisaalta, jos matkan alkupuolella ei synny viiveitä, pelivara menee hukkaan. Pelivaran määrän painopiste matkan osan alusta lukien saa arvon 0,425, kun pelivara on jaettu optimaalisesti matkan osille. Pelivaran jakaminen on lähes riippumaton liikennepaikkavälien määrästä.

Pelivaran optimaalisen jakamisen vaikutus viiveiden lyhenemiseen on esitetty kuvassa 13. Mitä enemmän liikennepaikkavälejä matkalla on, sitä enemmän viiveet lyhenivät verrattuna tasaisesti jaettuun pelivaraan.



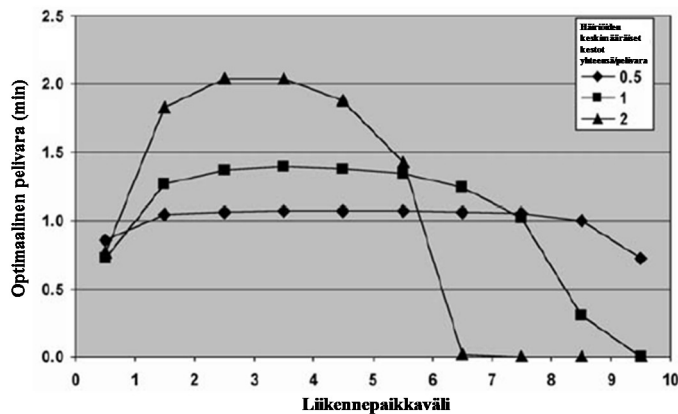
Kuva 13. Pelivaran optimaalisen jakamisen vaikutus keskimääräiseen viiveeseen verrattuna tasaisesti jaettuun pelivaraan (Vromans 2005).

Kuva 14 esittää pelivaraa jäävän käyttämättä melkein 10 prosenttia enemmän, kun se jaetaan optimaalisesti eikä tasaisesti. Aikaisin käytetty pelivara vähensi matkan alussa syntyviä viiveitä.



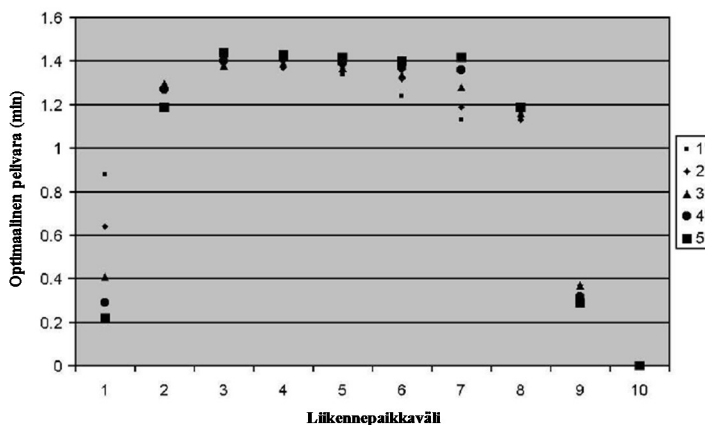
Kuva 14. Käytetty ja käyttämätön pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla sekä optimaalisesti että tasaisesti jaetulle pelivaralle (Vromans 2005).

Kuvassa 15 on esitetty pelivaran optimaalinen jakaminen, kun liikennepaikkavälien häiriöiden keskimääräisten kestojen summa on yhteensä pelivaran määrään nähden puolet, yhtä suuri tai kaksinkertainen. Pelivaran määrän painopiste matkan alusta lukien sai arvon 0,32, kun häiriöiden summa oli kaksinkertainen pelivaran määrään nähden. Häiriöiden summan ollessa puolet pelivaran määrästä, painopiste sai arvon 0.49. Pelivaran optimaalinen jakaminen riippuu siis selvästi häiriöiden keskimääräisestä kestosta.



Kuva 15. Optimaalinen pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla häiriöiden keskimääräisen keston summan eri arvoilla (Vromans 2005).

Kuva 16 esittää pelivaran optimaalisen jakamisen erisuuruksilla täsmällisyyden raja-arvoilla, kun liikennepaikkavälien häiriöiden keskimääräisten kestojen summa on yhtä suuri kuin pelivaran määrä. Täsmällisyyden raja-arvon kasvaessa ensimmäisen liikennepaikkavälin pelivaran määrä väheni, koska pienemmän täsmällisyysvaatimuksen takia lyhyillä viiveillä ei ole merkitystä. Erot ensimmäisen liikennepaikkavälin pelivarojen määrässä tasoittuivat lähes pelkästään liikennepaikkaväleillä 6 ja 7.



Kuva 16. Optimaalinen pelivara 10 liikennepaikkavälin matkalla täsmällisyyden raja-arvoilla 1–5 minuuttia (Vromans 2005).

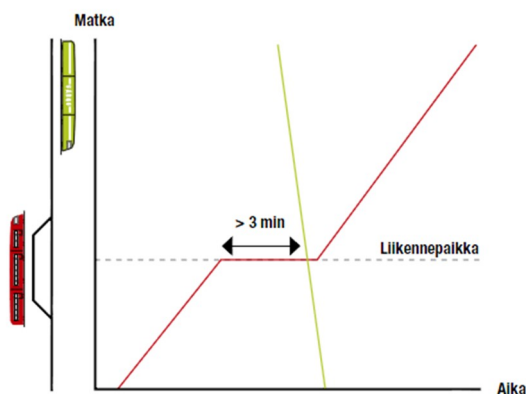
3.3.5 Odotukset

Odotukset aiheutuvat junakohtaamisista ja -ohituksista. Ne sisältävät jarruttamiseen, pysähdyksissä olemiseen ja kiihdyttämiseen kuluvan ajan. (Sipilä 2008) Rautatieliikenteelle on ominaista kohtaous- ja ohituspaikkojen sekä vaihtoehtoisten reittien rajallisuus. Mahdollisuus kohtaamiseen ja ohittamiseen riippuu muun muassa ohitusraiteiden ja vaihteiden sijainnista, turvalaitteista ja junatyypistä. Kohtaous- ja ohituspaikka ei välttämättä ole siellä, missä junat luonnostaan kohtaisivat. (RHK 2007.) Oksasen mukaan kohtaamis- ja ohituspaikkojen sijainti asettaa rajoituksia junien kulkuaan ja yhteensovittamiseen, jotka suunnitellaan aikatauluun minuutin tarkkuudella.

Suomen rataverkolla junakohtaamisia ja -ohituksia on paljon, koska rataverkosta noin 90 prosenttia on yksiraiteista. Lisäksi, hitaimpien ja nopeimpien junien väliset

nopeuserot ovat suuret. Yksiraiteisella rataosalla hitaamman junan ohittaminen tai vastaantulevan junan kohtaaminen onnistuvat ainoastaan ohitusraiteilla tai liikennepaikoilla, joissa juna pystyy ajamaan sivuun pysähtyäkseen. Joidenkin liikennepaikkojen raidepituus ei riitä pisimmille junille. Mainittujen syiden takia aikataulusuunnittelussa pitää huomioida kohtaus- ja ohituspaikan raiteiden lukumäärä ja hyötYPituus. (RHK 2007)

Turvallaitetekniikka asettaa rajoituksia liikennepaikoissa tapahtuville ohituksille. Pitkäsén mukaan ohitettavan junan odotusaika sivuraiteella ennen ohittavan junan saapumista ja liikennepaikalta poistumisen jälkeen riippuvat Suomessa raide- ja kauko-ohjausjärjestelyistä. Kuva 17 esittää yksiraiteisella rataosalla tapahtuvaa junakohtaamista aikataulussa.



Kuva 17. Junien kohtaaminen yksiraiteisella rataosalla (RHK 2007).

Junakohtaamisten ja -ohitusten määrän lisääminen kasvattaa ratakapasiteettia. Ne kuitenkin pidentävät pysähtyvän junan ajoaikaa ja lisäävät aikataulun häiriösietoisuutta heikentäviä junien välisiä riippuvuuksia. (Vromans 2005.) Kohtaus- ja ohituspaikkojen hallinta onkin avaintekijä yksiraiteisen rataosan täsmällisyydelle (Olsson ja Haugland 2004). Odotuksiin kuluva aika lisää myös liikennöintikustannuksia (Aronson et al. 2003). Toisaalta, jos kohtaus- ja ohituspaikkoja ei ole tarpeeksi, viiveistä palautuminen ja niiden ketjuuntumisen estäminen on Helanderin mukaan hyvin vaikeaa.

Matkustajajunien priorisoiminen tavarajunien edelle junakohtaamisissa ja -ohituksissa etusijajärjestyksen mukaisesti vaikuttaa haitallisesti tavarajunien kuljetusaikoihin ja -kustannuksiin sekä kalustokierron tehokkuuteen (RHK 2006). Kososen mukaan nopeiden tavarajunien aikataulunmukainen ajoaika kasvaa paljon teoreettista ajoaikaa suuremmaksi, jos niillä on aikataulussa paljon odotuksista johtuvia hidastuksia ja kiihdytyksiä.

3.3.6 Viive

Viive tarkoittaa junan toteutuneen ajoajan ja aikataulunmukaisen ajoajan eroa minuuteissa. Se voi olla negatiivinen tai positiivinen. (Mattsson 2004, Salkonen et al. 2009.) Tilastollisesti selkeästi suurempi määrä junista on myöhässä kuin etuajassa, joten yleensä viive on positiivinen (Mattsson 2004). Etuajassa kulkua ilmenee lähinnä tavarajunaliikenteessä. Se saattaa koko matkan mittakaavassa vaikuttaa muiden junien kulkuun sekundaaristen viiveiden muodossa (Liikennevirasto 2010b).

Aikataulusuunnittelussa huomio kohdistuu lyhyisiin ja toistuviin viiveisiin, koska pitkien viiveiden hallinta edellyttää junien kulun uudelleenjärjestelyä (Dewilde 2011).

Viiveet johtuvat primaarisista ja sekundaarisista häiriöistä. Primaarinen häiriö vaikuttaa suoraan junan kulkuun eikä ole toisen junan aiheuttama. Altistuessaan primaariselle häiriölle, yksittäinen tai useampi juna aiheuttaa usein sekundaarisia häiriöitä muille junille. Mitä pidempi primaarinen häiriö on, sitä merkittävämpiä ovat sekundaariset häiriöt. (Vromans 2005)

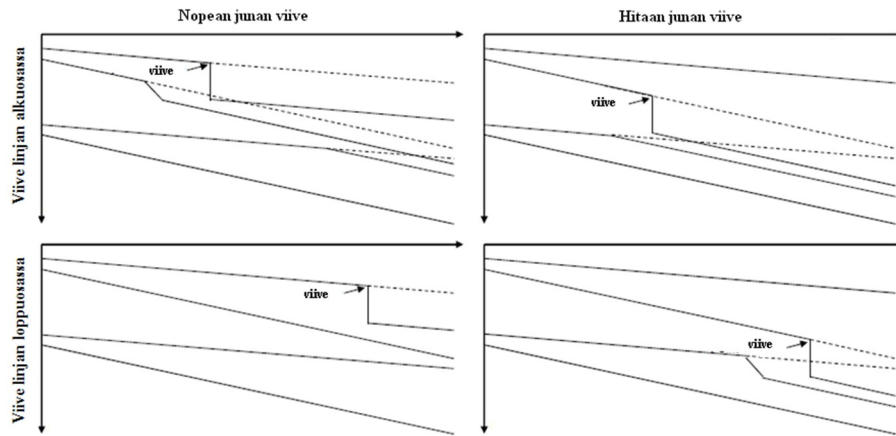
Sekundaarisista häiriöistä aiheutuvat viiveet voidaan jakaa kahteen luokkaan. Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat viiveet syntyvät toisen juna estäessä toisen junan kulun, kuten nopeamman junan ajaessa hitaamman ja myöhästyneen junan perässä minimijunavälillä. Toiseen luokkaan kuuluvat viiveet johtuvat junien synkronointiin liittyvistä tilanteista, kuten junan kokemasta ylimääräisestä odotuksesta vaihtoyhteyden tai junakohtaamisen takia. Junavälin puskuriajalla voidaan vaikuttaa estevaikutusten aiheuttamien viiveiden syntymiseen. Synkronointiluokan viiveet riippuvat aikataulurakenteesta ja kalustokierrosta. (Goverde 2005)

Viiveet ovat erityisen suuri ongelma, kun junien välillä on paljon riippuvuuksia ja ratakapasiteetin käyttöaste on korkea: tällöin ne ketjuuntuvat herkästi (Goverde 2005). Myös junamäärä ja liikenteen heterogeenisuus vaikuttavat viiveiden ketjuuntumiseen (Liikennevirasto 2010c).

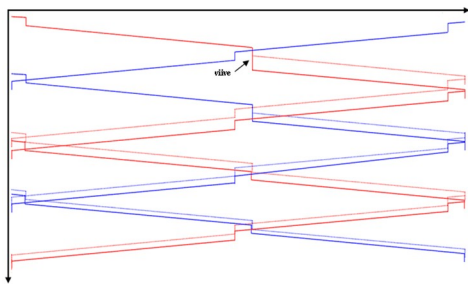
Viiveet vaikuttavat herkemmin täsmällisyyteen lähiliikenteessä kuin kaukoliikenteessä (Liikennevirasto 2010b). Nurkan mukaan vuorovälin ollessa tiheä matkustaja ei tosin välttämättä huomaa nousseensa myöhässä olevaan junaan.

Viiveiden ketjuuntumisen riski ja haitat puolestaan ovat nopeille kaukojunille suuremmat kuin hitaille lähijunille, koska ne liikennöivät pidemmällä matkoilla. Lisäksi niiden jarruttaminen ajonopeudesta ja kiihdyttäminen takaisin ajonopeuteen kestää kauemmin. (Landex 2008.) Kososen mukaan hidastukset ja kiihdytykset myös lisäävät ajoaikojen hajontaa, joten kyseisten junien junaväleihin tarvitaan normaalia enemmän ratakapasiteettia vievää puskuriaikaa.

Suurimmillaan viiveiden ketjuuntumisen riski on junien ajaessa lähekkäin, tyypillisesti linjaosien päissä. Kuva 18 havainnollistaa, kuinka kaksiraiteisella rataosalla nopean junan altistuminen viiveelle linjaosan alussa ja hitaan junan altistuminen viiveelle linjaosan lopussa ovat ketjuuntumisen kannalta pahimmat vaihtoehdot. Toisin kuin kaksiraiteisella rataosalla, yksiraiteisella rataosalla viiveet ketjuuntuvat molempiin ajosuuntiin (kuva 19) (Landex 2008).

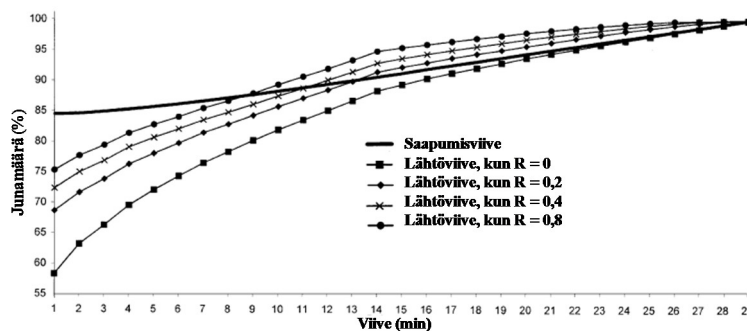


Kuva 18. Viiveen tapahtumapaikan ja sille altistuneen junan nopeustason vaikutus viiveen ketjuuntumiseen kaksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).



Kuva 19. Viiveiden ketjuuntuminen molempiin ajosuuntiin yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).

Carey ja Carville (2000) tutkivat simuloimalla junien keskimääräisen saapumisviiveen vaikutusta niiden lähtöviiveeseen suurilla, tiheään liikennöidyillä asemilla (kuva 20). Lähtöviiveeseen vaikuttaa saapumisviiveen lisäksi aikataulunmukaisen pysähdysajan ja minimipysähdysajan perusteella laskettava suhdeluku R (kaava 3).



Kuva 20. Junien saapumisviiveiden vaikutus lähtöviiveisiin (junamäärä [%] kuvaa, kuinka suuri osa junista saapuu tai lähtee tietyn viiveen [min] puitteissa. (Carey 2000)

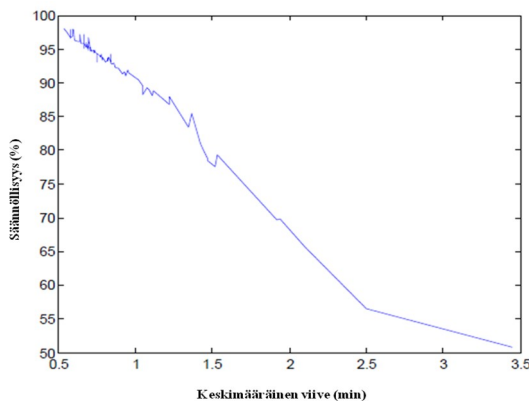
$$R = \frac{T_s \cdot T_m}{T_s}, \text{ jossa} \quad (3)$$

T_s on aikataulutettu pysähdysaika
 T_m on minimipysähdysaika

Suhdeluku R :n kasvu korreloi ajoissa lähtevien junien määrän kanssa kaikilla saapumisviiveen arvoilla. Mitä pienempi saapumisviive oli, sitä pienempi osa junista

lähti liikkeelle vastaavan suuruusella lähtöviiveellä. Saapumisviiveen kasvaessa tarpeeksi suureksi (noin 14 minuuttia), lähti suurempi osa junista liikkeelle vastaavan suuruusella lähtöviiveellä. Careyn ja Carvillen (2000) mukaan R on hyvä mittari aikataulusuunnitteluun, koska junien minimipysähdysajan pienentäminen asemien järkevällä resurssienkäytöllä parantaa junien lähtötäsmällisyyttä.

Hofman ja Madsen (2005) tutkivat simuloimalla junien asemille saapumisaikojen keskimääräisen viiveen ja liikenteen säännöllisyyden välistä riippuvuutta (kuva 21). Simuloinnit tehtiin aikatauluille, joiden kesken oli eroa muun muassa junamäärissä, puskuriajoissa ja kalustokierrossa. Riippuvuus havaittiin lineaariseksi. Kun viive junan asemalta lähdössä puolestaan ylittää kriittisen raja-arvon kasvaessaan, merkittävien viiveiden todennäköisyys nousee huomattavasti (Olsson ja Haugland 2004).



Kuva 21. Junien asemille saapumisaikojen keskimääräisen viiveen ja liikenteen säännöllisyyden välinen riippuvuus (Hofman ja Madsen 2005).

Viiveistä johtuvien myöhästymisten kustannukset vaihtelevat paljon matkan päämäärästä ja tarkoituksesta riippuen. Tämän takia arvioinnissa käytetään karkeitakin yleistyksiä. (Salkonen 2008.) Vaihtoaikojen lyhentäminen ja myöhästymisten välttäminen arvotetaan ajoajan lyhentämistä korkeammalle (Pesonen ja Moilanen 2006).

Kahden minuutin myöhästyminen 50 prosentin todennäköisyydellä koetaan pahemmaksi kuin varmuudella tapahtuva minuutin myöhästyminen: matkustajalle myöhästymisen arvo on siis matka-ajan arvoa suurempi (Rietveld ym. 2001). Ajoaikasäästön arvo kasvaa matkan pidentyessä (Pesonen ja Moilanen 2006).

Sveitsiläisen tutkimuksen mukaan myöhästymiskustannukset kasvavat jyrkemmin 10 minuutin raja-arvoon asti kuin sen jälkeen. Myös saksalaisessa tutkimuksessa, jossa esitetään menetelmä myöhästymisen arvon laskemiseksi joukkoliikenteelle (kaava 4), havaittiin sama myöhästymiskustannusten kasvun pieneneminen (Nyström 2008). Liitteissä A.1–3 on esitetty lisää kotimaisiin ja eurooppalaisiin tutkimuksiin perustuvia matka-ajan osatekijöiden ja myöhästymisen arvoja.

$$V_d = 0,074 \cdot t_d \cdot \left(\frac{P_d}{0,40}\right)^{2,233}, \text{ jossa} \quad (4)$$

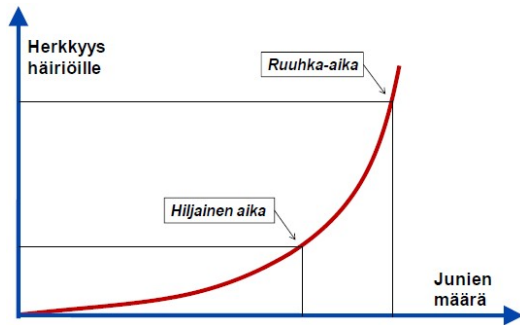
V_d on myöhästymisen arvo (Sveitsin frangia)

t_d on myöhästymisen kesto

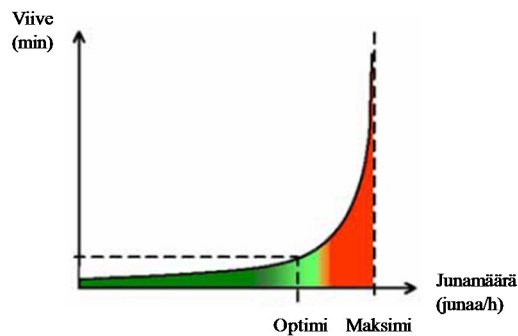
P_d on myöhästymisen todennäköisyys

3.4 Junamäärä

Junamäärän kasvaessa keskimääräinen junaväli ja mahdollisuus pelivaran lisäämiseen pienenevät, jolloin häiriöt leviävät rataverkolla herkemmin (Liikennevirasto 2010c). Junamäärän ylittäessä tietyn raja-arvon kasvaessaan, lisääntyvät aikataulun häiriöherkkyys (kuva 22) ja keskimääräiset viiveet (kuva 23) eksponentiaalisesti.



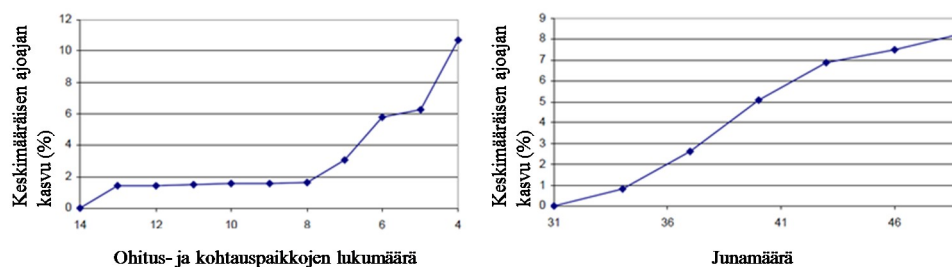
Kuva 22. Junamäärän vaikutus aikataulun häiriöherkyyteen (Liikennevirasto 2010c).



Kuva 23. Junamäärän vaikutus keskimääräiseen viiveeseen ja siihen perustuva optimijunamäärä (Kandels ja Gröger 2005).

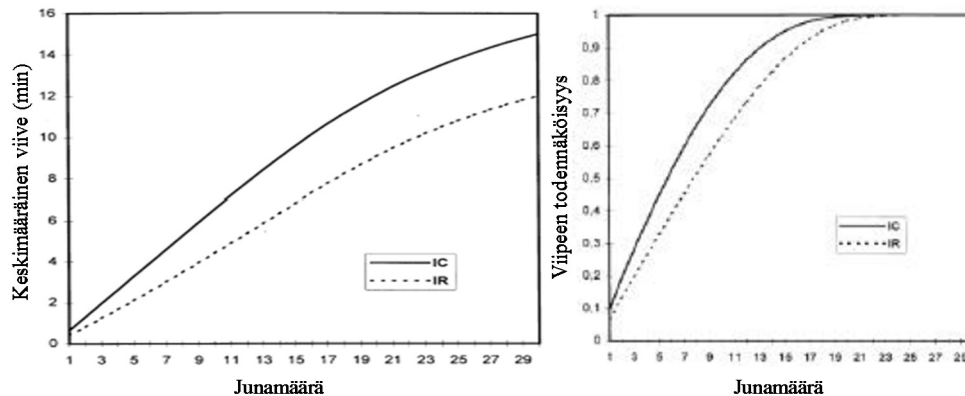
Optimijunamäärä on junien keskimääräisen odotusajan suhteellisen herkkyuden perusteella 50–60 prosenttia maksimijunamäärästä (Pachl 2002). Junamäärän kasvaessa tästä, laskee rataosan palvelutaso merkittävästi (Kandels ja Gröger 2005).

Ferreiran ja Higginsin (1996) menetelmä arvioi yksiraiteisen rataosan optimaalisen junamäärän. Sillä voidaan myös tutkia, miten kohta- ja ohituspaikkojen määrän väheneminen ja junamäärän kasvu vaikuttavat junien keskimääräiseen ajoaikaan (kuva 24).



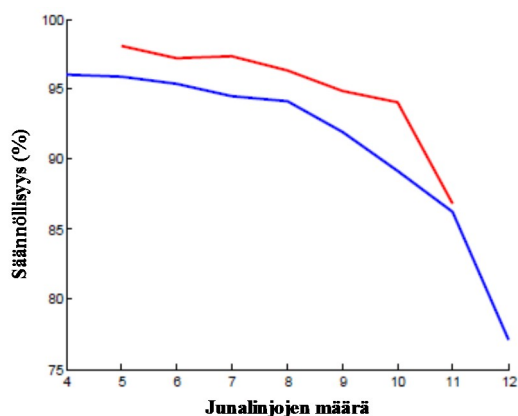
Kuva 24. Ohitus- ja kohtaustaikkojen lukumäärän ja junamäärän vaikutus junien keskimääräiseen ajoaikaan (Ferreira ja Higgins 1996).

Huismanin ja Boucherien (2001) menetelmä arvioi keskimääräisen sekundaarisen viiveen ja sen todennäköisyyden junamäärän funktiona kaksiraiteiselle rataosalle, jonka liikenne on heterogeenistä ja jossa ohittaminen ei ole sallittua (kuva 25). Mallissa minimijunaväli oli 2 minuuttia. Junamäärän lisääntyessä keskimääräinen viive ja viiveiden todennäköisyys kasvoivat, koska yhä suurempi osa kaukojunista joutui hidastamaan nopeuttaan lähijunien takia.



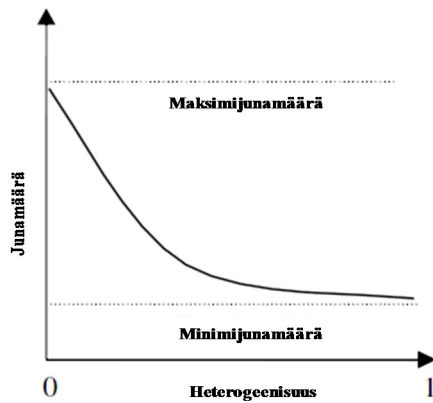
Kuva 25. Keskimääräinen sekundaarinen viive ja viiveen todennäköisyys junamäärän (junaa/h) funktiona kaksiraiteisella rataosalla, jossa liikenne on heterogeenistä eikä ohittaminen ole sallittua (IC tarkoittaa kaukojunia ja IR lähijunia) (Huisman ja Boucherie 2001).

Hofman ja Madsen (2005) tutkivat simuloimalla liikenteen säännöllisyyden riippuvuutta junalinjojen määrästä (kuva 26). Simuloinnit tehtiin monille eri aikatauluille, joiden välillä oli eroa muun muassa puskurijajoissa, junamäärissä ja kalustokierrossa. Junalinjojen määrän kasvaessa liikenteen säännöllisyys heikkeni junavälien pienenemisen takia, mutta riippuvuus ei ole lineaarinen.



Kuva 26. Liikenteen säännöllisyyden riippuvuus junalinjojen määrästä (sininen viiva kuvaa riippuvuutta alun perin 12 junalinjaa ja punainen 11 junalinjaa sisältäneessä aikataulussa) (Hofman ja Madsen 2005).

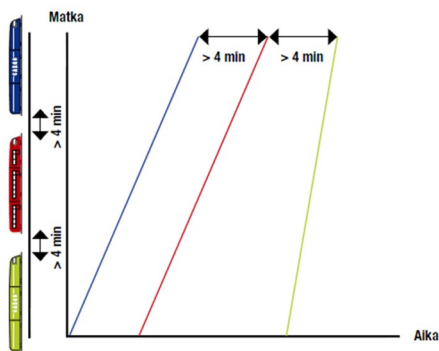
Kuva 27 esittää Landexin (2008) menetelmään (luku 3.7.2, kaava 7) perustuvaa aikataulun suurimman mahdollisen junamäärän riippuvuutta liikenteen heterogeenisuudesta. Heterogeenisuuden saadessaan maksimiavonsa, voidaan junia ajaa absoluuttinen minimimäärä ja päinvastoin. Heterogeenisuuden ylitettyä tietyn raja-arvon kasvaessaan, aikataulun suurimman mahdollisen junamäärän väheneminen loivenee merkittävästi.



Kuva 27. Aikataulun junamäärän riippuvuus liikenteen heterogeenisuudesta (Landex 2008).

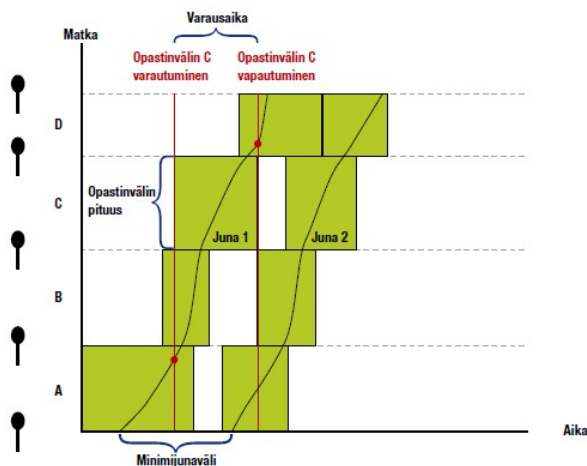
3.5 Junaväli

Junaväli tarkoittaa peräkkäisten junien aikaväliä. Se on riippuvainen rataosan suojastuksesta. Junavälit suunnitellaan Suomessa useimmiten vähintään 4 minuutin pituisiksi. (RHK 2007.) Kuva 28 esittää, miten junavälit näkyvät aikataulussa.

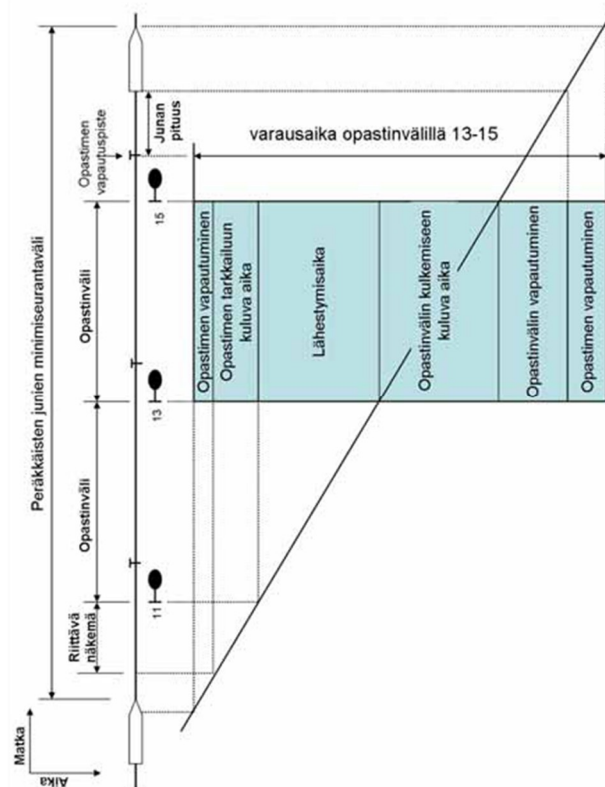


Kuva 28. Junavälit aikataulussa (RHK 2007).

Suomessa on käytössä kiinteävälinen suojastus, joka perustuu opastimiin ja opastinvälien varausaikoihin. Opastinväli voi olla kerrallaan vain yhden junan käytössä. (RHK 2007.) Kuvassa 29 on esitetty minimijunavälin sekä opastinvälin pituuden ja varausajan välinen yhteys. Varausaika koostuu kuvassa 30 esitetyistä tekijöistä.



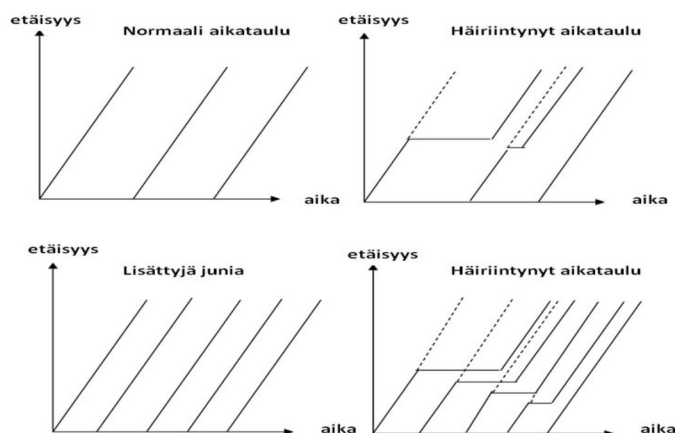
Kuva 29. Minimijunavälin, opastinvälin pituuden ja opastinvälin varausajan yhteys (RHK 2007).



Kuva 30. Opastinvälin varausaika (Pachl 2002).

Minimijunavälit saadaan selville tiivistämällä varausaikavälit mahdollisimman lähelle toisiaan. Varausaikaväli ei koske ainoastaan peräkkäisiä, vaan myös vastaantulevia ja saman pisteen kautta kulkevia junia. (RHK 2007)

Jos junaväli on lähellä minimiään, myöhästynyt juna viivästyttää perässä kulkevaa junaa herkästi. Tällöin viive saattaa ketjuuntua laajasti sekä ajallisesti että paikallisesti. Tämän takia junavälit on hyvä mitoittaa minimiä suuremmiksi. (RHK 2007.) Aikataulun häiriösietoisuus paranee, jos opastinvälien varausajat ovat mitoitettu junien pysähdysaikojen ja nopeuserojen sekä junavälien mukaan (Hansen 2010). Ruuhka-aikana keskimääräinen junaväli on pieni, mikä tehostaa ratakapasiteetin käyttöä (Mukula 2008), mutta herkentää viiveiden ketjuuntumista (kuva 31) (Gibson 2002).



Kuva 31. Junien lisäämisen vaikutus viiveiden ketjuuntumiseen (Gibson 2002).

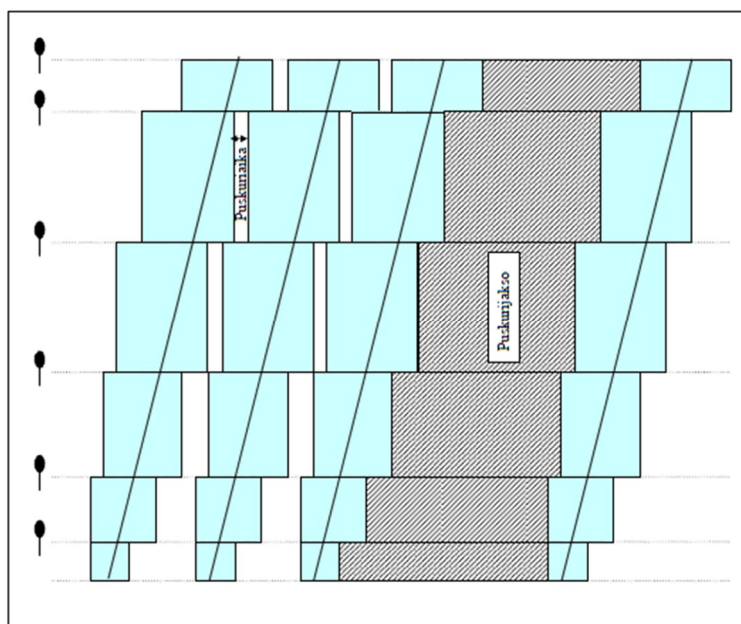
Junavälien pituudet ja niiden keskihajonta ovat hyviä mittareita aikataulun luotettavuudelle: homogeeniset, riittävät junavälit lisäävät aikataulun häiriösietoisuutta. Kun junien lähtöaikavälit asemilla aikataulutetaan samansuuruisiksi ja junien viiveet ovat jakautuneet tasaisesti, liikenteen täsmällisyys paranee huomattavasti. Mittareita täsmällisyyden ennustamiselle ovat muun muassa

- tietyn suuruuden alittavien junavälien osuus
- junavälijakauma
- junavälien keskihajonta. (Carey 1999)

Minimijunaväliin lisättävä puskuriaika estää tai vaimentaa häiriöiden leviämisen ja määrittää, kuinka paljon juna voi poiketa aikataulustaan vaikuttamatta toisen junan kuluun. Sitä ei tule sekoittaa pelivaraan. (Koolstra 2005.) Puskuriajan suuruus määritetään harvoin tilastollisen analyysin perusteella; yleensä nyrkkisäännöt ja simuloinnit määräävät sen (Hansen 2010). Suurin osa rautatieyhtiöistä käyttää seuraavia nyrkkisääntöjä:

- paljon puskuriaikaa, kun jälkimmäinen juna on ensimmäistä junaa tärkeämpi etusijajärjestyksessä
- vähän puskuriaikaa, kun ensimmäinen juna on jälkimmäistä junaa tärkeämpi etusijajärjestyksessä
- normaalisti puskuriaikaa, kun junat ovat yhtä tärkeitä etusijajärjestyksessä. (Pachl 2008.)

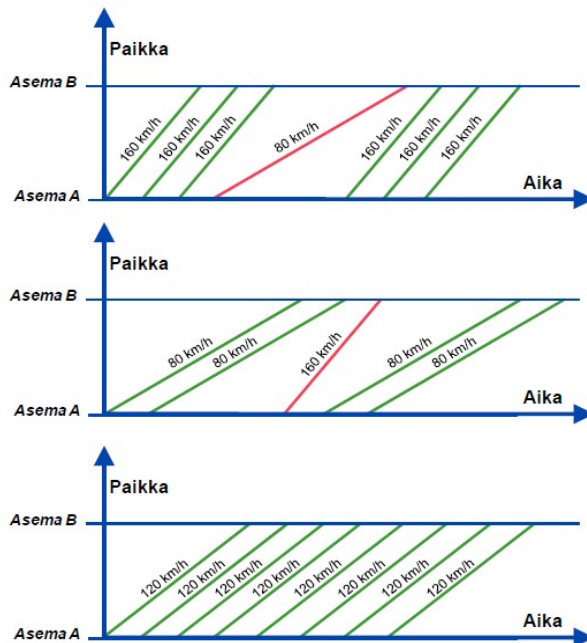
Mukulan (2008) haastatteleman asiantuntijan mukaan Suomen aikataulurakenteen takia häiriöt jäävät elämään rataverkolle pitkäksi aikaa. Liikenteen toipumista häiriöistä voidaan parantaa lisäämällä puskurijakso etenkin ruuhkahuipun jälkeiselle ajalle. Saksassa tehdyssä tutkimuksessa havaittiin puskuriaikojen pituudella olevan vaikutus 80 prosenttiin juna-asemilla mitatuista viiveistä (Hansen 2010). Kuvassa 32 on esitetty puskuriajan ja puskurijakson lisääminen aikatauluun.



Kuva 32. Puskuriajan ja puskurijakson lisääminen aikatauluun (Pachl 2002).

3.6 Junien nopeusero

Junien nopeuserojen kasvu vähentää ratakapasiteettia ja lisää liikenteen heterogeenisuutta (Goverde 2005, Vromans 2005). Aikataulusuunnittelu helpottuisi huomattavasti, jos junat kulkisivat samalla nopeudella (Mäkitalo 2001). Kuvassa 33 on havainnollistettu junien nopeuserojen vaikutusta kapasiteettiin.



Kuva 33. Junien nopeuserojen vaikutus ratakapasiteettiin (Liikennevirasto 2010c).

Nopeiden junien kulku pitää sovittaa hitaiden junien kulkuun ratakapasiteetin käyttöasteen ollessa korkea, mikä kasvattaa ajo- ja odotusaikoja yksiraiteisilla rataosilla (Landex 2009). Suomessa on kilpailusyistä lisätty matkustajaliikenteen junien nopeuksia, mutta tavarajunien nopeuksia ei ole kyetty nostamaan samassa suhteessa. Tämä on osaltaan vaikuttanut liikenteen täsmällisyyden heikkenemiseen. (Iikkanen ja Siren 2005.) Tanskalaisen rautatieyritys DSB:n mukaan aikataulussa ei pitäisi ruuhka-aikana olla tavarajunia junien nopeuserojen vähentämiseksi ja ratakapasiteetin käytön tehostamiseksi (Schittenhelm 2011).

3.7 Liikenteen heterogeenisuus

3.7.1 Liikenteen heterogeenisuus palvelutasotekijänä

Rautatieliikenne on sitä homogeenisempää, mitä vähemmän junien keskinopeudet ja junavälit vaihtelevat. Kansallisten rautateiden liikenne ei käytännössä voi olla homogeenista, koska nopeuksiltaan ja pysähdystarpeiltaan eroavat matkustaja- ja tavarajunat sekä lähi- ja kaukojunat käyttävät samoja raiteita. (Vromans et al. 2006.) Kaksiraiteisille rataosille on helpompi suunnitella homogeeninen liikenne kuin yksiraiteisille, koska ajosuuntien liikenne ei riipu toisistaan (Landex 2008).

Aikataulusuunnittelu on vaikeaa liikenteen ollessa heterogeenista pitkillä etäisyyksillä. Heterogeenisuus johtaa yleensä moniin pieniin junaväleihin, mikä lisää viiveiden

ketjuuntumista. Vaikka liikenne olisikin heterogeenisista, junavälien pitäisi olla tasaisia (Vromans 2005). Liikenteestä voidaan tehdä homogeenisempaa seuraavilla keinoilla:

- *Kaukojunien hidastaminen* pidentää niiden ajoaikoja ja osan matkustajista matka-aikoja, mutta tekee liikenteestä luotettavampaa.
- *Lähijunien ja usein pysähtyvien junien nopeuttaminen pelivaraa pienentämällä* saattaa heikentää luotettavuutta merkittävästi, kun taas *nopeamman junakaluston käyttäminen* nostaa merkittävästi operointikustannuksia.
- *Junakohtaamisten ja -ohitusten lisääminen* pidentää pysähtyvän junan ajoaikaa ja lisää junien välisiä riippuvuuksia.
- *Junalinjojen lyhentäminen* lisää vaihtoyhteyksiä ja junien kääntymisiä.
- *Asemilla pysähdysten määrän tasaaminen* lisää kaukojunien ja vähentää lähijunien pysähdyksiä. (Vromans 2005)

Asemilla pysähdysten määrän tasaaminen on näistä helpoin toteuttaa lyhyellä aikavälillä ja lupaavin pitkällä aikavälillä junaohitusten lisäämisen ohella. Suuren rautatieyrityksen junien homogenisointi saattaa vapauttaa muille rautatieyrityksille aukkoja aikatauluun junien lisäämiselle, mikä voi johtaa heterogeenisempaan liikenteeseen. Tämän takia koko aikataulun onnistunut homogenisointi edellyttää osapuolten välistä yhteistyötä. (Vromans 2005)

3.7.2 Liikenteen heterogeenisuuden määrittäminen

Vromansin et al. (2004) menetelmällä voidaan arvioida aikataulun häiriösietoisuutta liikenteen heterogeenisuuden perusteella: heterogeenisuudella on havaittu olevan selkeä negatiivinen korrelaatio häiriösietoisuuden kanssa. Menetelmä perustuu tarkasteltavan aikatauluosan pienimpien junavälien käänteislukujen summaan *SSHR* (kaava 5) ja saapumisaikavälien käänteislukujen summaan *SAHR* (kaava 6).

$$SSHR = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^-}, \text{ jossa} \quad (5)$$

h_i^- on pienin aikaväli junien i ja $i+1$ välillä, junan 1 seurattessa junaa n

$$SAHR = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^A}, \text{ jossa} \quad (6)$$

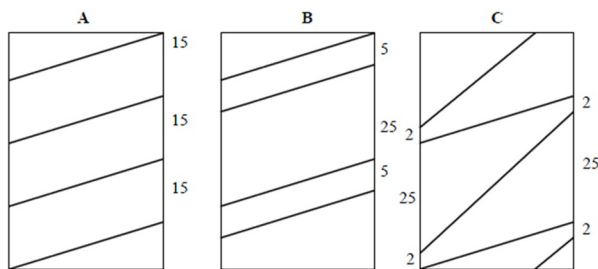
h_i^A on saapumisaikaväli junien i ja $i+1$ välillä, junan 1 seurattessa junaa n

SSHR-mittarissa lähtöaikavälit arvioidaan saapumisaikavälien kanssa yhtä suuriksi, vaikka saapumisaikavälien tarkastelu on tärkeämpää. Ensinnäkin, saapumisviiveet ovat lähtöviiveitä keskimäärin suurempia. Toiseksi, kaukojunat saattavat jäädä lähijunien hidastamiseksi rataosan loppua kohden. *SAHR*-mittari huomioi nämä tekijät, muttei tarkastele koko rataosaa vaan yksittäistä liikennepaikkaa. Mittarien painotetun keskiarvon laskeminen on tietyissä tapauksissa järkevää. (Vromans et al. 2004)

Mittarien arvojen kasvaessa aikataulun heterogeenisuuskin kasvaa, jos junamäärä pysyy samana. Mitä suurempi arvojen erotus on suhteessa *SSHR*-arvoon, sitä enemmän suhteellisesti junien välillä on nopeuseroja tai ne sijaitsevat kriittisissä kohdissa (pienen junavälin junapari). Mittarien pienin arvo saadaan, kun junavälit ovat tasaiset eikä junien välillä ole nopeuseroja. Kahden junamääriltään ja junien nopeuseroiltaan

samanlaisen aikataulun mittarien välinen ero selittyy junaväleillä: *SAHR* saa pienimmän mahdollisen arvonsa aikataulussa tasaisilla saapumisaikaväleillä, *SSHR* puolestaan tasaisilla junaparien pienimmillä aikaväleillä (lähteminen tai saapuminen). Mittarit saavat samat arvot, kun junilla ei ole nopeuseroja ja kaikki aikataulun junat sekä lähtevät että saapuvat tarkasteltavalla aikavälillä. (Vromans et al. 2006.)

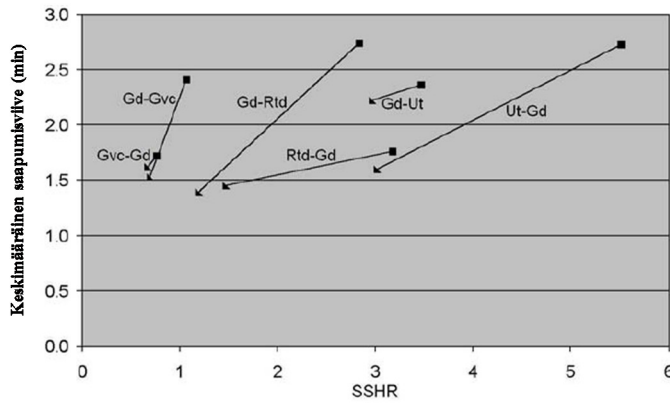
Kuvan 34 aikataulujen A ja B ratakapasiteetin käyttöaste on sama (C:ssä eri) eikä junien välillä ole nopeuseroja, mutta junavälit ovat erisuuruiset. Kaava 5 antaa aikataululle A arvon $3/15$ ja aikataululle B arvon $11/25$. Kaava 6 antaa samat arvot, koska molemmat aikataulut ovat junanopeuksiltaan homogeeniset. Junanopeuksiltaan heterogeenisissa aikatauluissa *SAHR*-arvo on aina *SSHR*-arvoa pienempi. Aikataulu C, jossa junien välillä on suuria nopeuseroja, saa kaavalla 5 arvon 2, mutta kaavalla 6 arvon $26/25$.



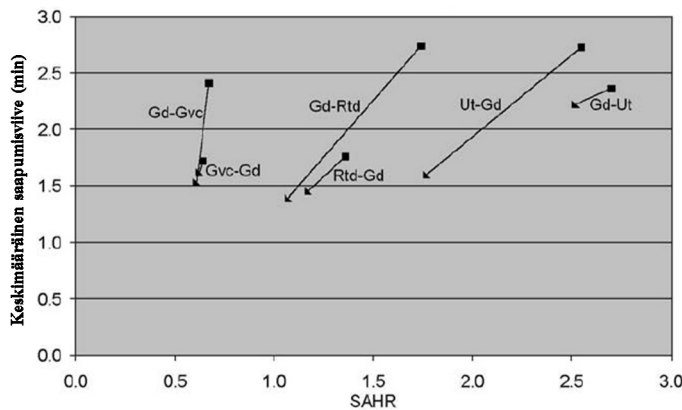
Kuva 34. Junanopeuksiltaan homogeeniset aikataulut A ja B sekä junanopeuksiltaan heterogeeninen aikataulu C (Carey 1999).

Vromans et al. (2004) tutkivat simuloimalla homogeenisen ja heterogeenisen aikataulun häiriösietoisuuden ja heterogeenisuusmittarien keskinäistä riippuvuutta. Aikatauluissa oli sama määrä junalinjoja ja asemilla pysähdyksiä. Myös linjojen väliset yhteydet sekä junakalusto olivat samanlaisia.

Homogeenisessa aikataulussa keskimääräiset viiveet jäivät yli 65 prosenttia heterogeenisia aikatauluja lyhyemmiksi. Erot syntyivät pääasiassa vähentyneiden sekundaaristen häiriöiden takia. Erityisesti simuloinneissa, joissa oli määrältään vähän ja pituudeltaan lyhyitä primaarisia häiriöitä, syntyi homogeeniselle aikataululle hyvin vähän sekundaarisia häiriöitä. Primaaristen häiriöiden ollessa pitkiä, homogeenisenkaan aikataulun junavälit eivät vaimentaneet sekundaarisia häiriöitä tehokkaasti. Tällöin erot keskimääräisissä viiveissä olivat pieniä aikataulujen välillä. Vaikka primaaristen häiriöiden kokonaiskesto olisivat olleet samat, pääasiassa pitkiä primaarisia häiriöitä sisältävien tapausten keskimääräiset viiveet olivat 20–30 prosenttia suurempia kuin lyhyitä primaarisia häiriöitä sisältävissä tapauksissa. (Vromans et al. 2006) Kuvista 35 ja 36 nähdään *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien ja junien keskimääräisen saapumisviiveen korrelaatio Vromansin (2005) tutkimilla rataosilla.



Kuva 35. SSHR-mittarin ja junien keskimääräisen saapumisviiveen välinen riippuvuus (Vromans 2005).



Kuva 36. SAHR-mittarin ja junien keskimääräisen saapumisviiveen välinen riippuvuus (Vromans 2005).

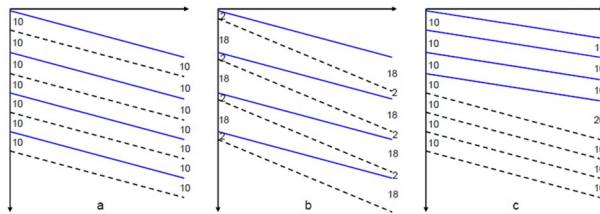
Liikenteen homogenisointi vähentää saapumisviiveitä; *SAHR*-arvon pienenemisellä on suurempi vaikutus. Mittarit eivät ole absoluuttisia ja soveltuvat parhaiten samalle rataosalle laadittujen aikatauluvaihtoehtojen vertailuun. Niillä saadaan viitteitä aikataulun luotettavuudesta: mittarien arvojen kasvu johtaa viiveiden ketjuuntumisen lisääntymiseen suuruudella, jota vaikea ennustaa. Arvojen minimointi on hyvä nyrkkisääntö, muttei aina paras ratkaisu: muutokset vaikuttavat eri suuruudella keskimääräisiin viiveisiin eri rataosien kesken. (Vromans et al. 2006)

Myös Landexin (2008) menetelmällä (kaava 7) voidaan määrittää aikataulun liikenteen heterogeenisuus; se saa arvon väliltä 0–1. Menetelmä perustuu junien lähtö- ja saapumisaikaväleihin, joiden pituudelle junien nopeuserot aiheuttavat vaihtelua.

$$\text{Heterogeenisuus} = 1 - \frac{\sum \left(\min \left(\frac{h_{t,i}^D}{h_{t,i+1}^D}, \frac{h_{t,i+1}^D}{h_{t,i}^D} \right) \times \min \left(\frac{h_{t,i}^A}{h_{t,i+1}^A}, \frac{h_{t,i+1}^A}{h_{t,i}^A} \right) \right)}{h_{N-1}}, \text{ jossa} \quad (7)$$

- $h_{t,i}^D$ on aikaväli asemalta lähdössä
- $h_{t,i+1}^D$ on seuranta-aikaväli asemalta lähdössä
- $h_{t,i}^A$ on aikaväli asemalle saavuttaessa
- $h_{t,i+1}^A$ on seuranta-aikaväli asemalle saavuttaessa
- h_{N-1} on aikavälien summa miinus 1

Kuvassa 37 on esitetty heterogeenisuudeltaan toisistaan eroavia aikatauluja. Aikataulu a:n heterogeenisuus saa kaavalla 7 arvon 0, eli aikataulu on täysin homogeeninen. Aikataulu b:ssä eri nopeusluokkien junat on sijoitettu vuoronperään. Sen heterogeenisuus saa arvon 0,99, eli aikataulu on lähes täysin heterogeeninen. Aikataulu c saa hyvän heterogeenisuuden arvon (0,14): junat on ryhmitelty nopeusluokkien mukaan ja kaikki aikavälit ovat yhtä lukuun ottamatta samansuuruisia. (Landex 2008)

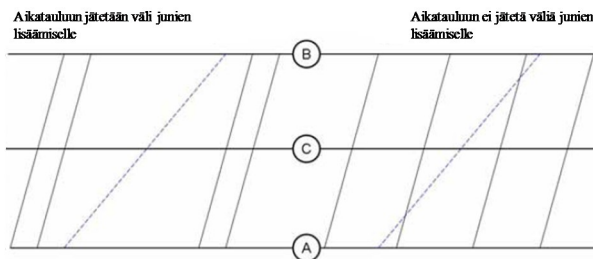


Kuva 37. Liikenteen homogeenisuudeltaan eroavat aikataulut (Landex 2008).

3.8 Junien lisäämismahdollisuus

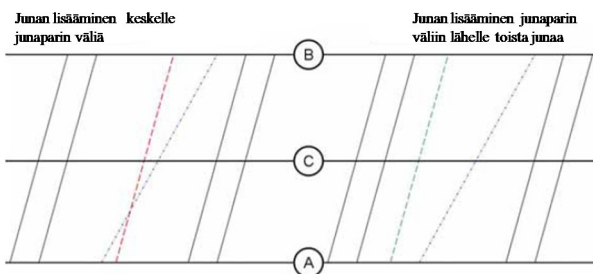
3.8.1 Junien lisäämismahdollisuus palvelutasotekijänä

Aikataulurakenne vaikuttaa junien lisäämismahdollisuuteen; junaväleiltään tasainen aikataulurakenne asettaa junien lisäämiselle enemmän rajoituksia kuin vakioaikataulurakenne (Schittenhelm 2008). Käyttämättä jäänyt ratakapasiteetti ei automaattisesti mahdollista junien lisäämistä (UIC 2004), jonka vaatimuksena on minimijunavälin jääminen aikataulun peräkkäisten junien väliin. Kuva 38 esittää aikataulurakenteen vaikutusta lisäämiselle.



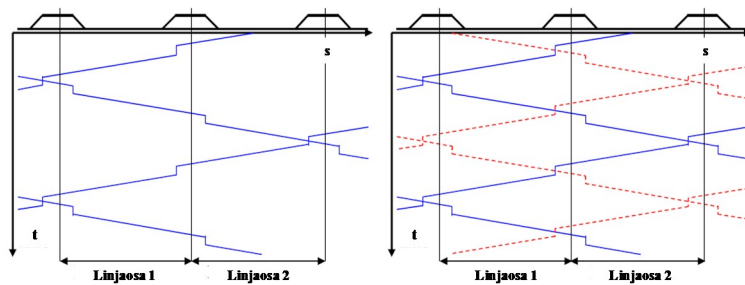
Kuva 38. Aikataulurakenteen vaikutus junien lisäämiseen (Pitkänen 2006).

Matkustajalle vasemmanpuoleinen vaihtoehto on huonompi, koska junat eivät liikennöi tasavuorovälein; ratakapasiteetin käytölle se on kuitenkin parempi vaihtoehto. Lisättävä juna kannattaa sijoittaa niin, että lisäyksille jää senkin jälkeen tilaa (kuva 39): junan lisääminen junavälin keskelle (punainen katkoviiva) ei jätä tilaa uusille lisäyksille, toisin kuin lisääminen junavälin reunaan (vihreä katkoviiva). (Pitkänen 2006)



Kuva 39. Junan lisääminen aikatauluun (Pitkänen 2006).

Kuva 40 esittää junien lisäämisen aikatauluun yksiraiteisella rataosalla. Lisäämisessä pitää huomioida minimijunavälien lisäksi kohta- ja ohituspaikat. (Landex 2008).



Kuva 40. Junien lisäämismahdollisuus yksiraiteisella rataosalla (Landex 2008).

Junan lisääminen ei aina kannata. Nopeaa matkustajajunalinjaa ei ole järkevää lisätä junaväliin, jos se esimerkiksi edellyttää hidasta ajonopeutta tai junaparin vieressä kulkee samankaltainen junalinja. (Landex 2008)

3.8.2 Junien lisäämismahdollisuuden määrittäminen

Samenin et al. (2011) menetelmä laskee junien lisäämismahdollisuudelle indeksin (kaava 8). Sen arvon kasvu parantaa lähtökohtaisesti junien lisäämismahdollisuutta.

$$\text{Junien lisäämismahdollisuuden indeksi} = \frac{n_{et}}{C_a - C_b}, \text{ jossa} \quad (8)$$

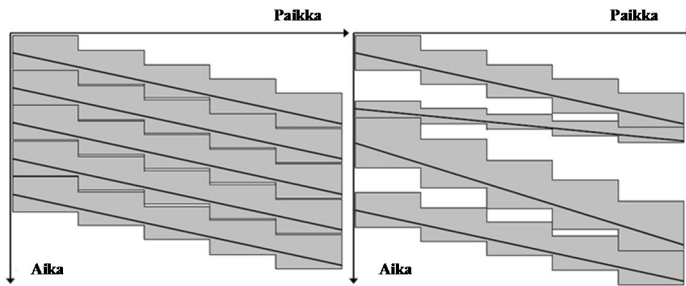
n_{et} on lisättävien junien määrä
 C_a on ratakapasiteetin käyttöaste ennen junien lisäämistä
 C_b on ratakapasiteetin käyttöaste junien lisäämisen jälkeen

3.9 Ratakapasiteetin käyttöaste

3.9.1 Ratakapasiteetin käyttöaste palvelutasotekijänä

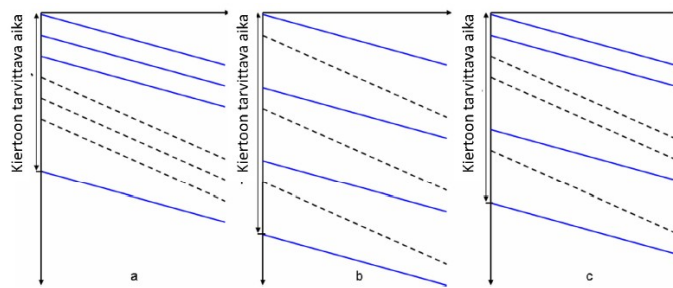
Ratakapasiteetin käyttöaste on liikennöinnin prosenttiosuus tietyistä ajanjaksosta. Sen määrittäminen ei edellytä tietoa kapasiteetista (Pitkänen 2006). Esimerkiksi vuorokauden ja sen huipputunnin käyttöasteet poikkeavat toisistaan. Suositukset sen raja-arvoiksi ovat sekajunaliikenteen radalla 75 prosenttia huipputunnille ja 60 prosenttia vuorokaudelle. Lähijunaliikenteen radalla raja-arvot ovat 85 ja 70 prosenttia. (UIC 2004.)

Junavälien summan tarkastelu yksittäisten junavälien sijaan on suurin ongelma ratakapasiteetin käyttöasteen käyttämiselle mittarina aikataulusuunnittelussa (Carey 1999, Vromans 2005). Käyttöaste ei myöskään kerro, miten kapasiteetti on hyödynnetty. Kuvan 41 vasemmanpuoleisen, homogeenisen aikataulun käyttöaste on pienempi kuin oikeanpuoleisen, heterogeenisen aikataulun, vaikka siinä liikennöi enemmän junia. Käyttöasteen rinnalla pitäisi tarkastella kapasiteetin hyödyntämistä, jolla voidaan selittää eri rataosien käyttöasteita. (Landex 2008.)



Kuva 41. Ratakapasiteetin käyttöasteen kätkevä tieto kapasiteetin hyödyntämisestä (Landex 2008).

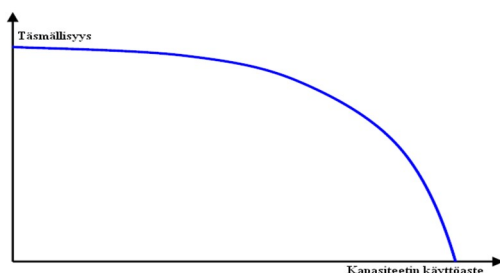
Ratakapasiteetin käyttöaste riippuu voimakkaasti liikenteen koostumuksesta. Junien nopeuserot lisäävät tarvetta järjestää ja priorisoida liikennettä, jotta kapasiteettia saadaan hyödynnettyä enemmän. Käyttöaste pienenee, kun nopeudeltaan samanlaisia junia ryhmitellään kulkemaan peräkkäin. (Pitkänen 2006.) Kuva 42 havainnollistaa ryhmittelyn vaikutusta kapasiteetin hyödyntämiseen. Se on tehokkainta vakioaikataulurakenteessa (Schittenhelm 2011).



Kuva 42. Junien ryhmittelyn vaikutus ratakapasiteetin käyttöasteeseen (Landex 2006).

Vasemmanpuoleisessa tilanteessa ratainfrastruktuurin haltijalle jää eniten ratakapasiteettia hyödynnettäväksi lisäjunia ja kunnossapitoa varten. Rautatieyritysten ja matkustajien näkökulmasta tällainen aikataulurakenne ei useimmiten ole hyvä. (Kaas 1998.) Junien ryhmittely kapasiteetin käyttöasteen pienentämiseksi johtaakin helposti junatarjontaan, jossa monia samantyyppisiä matkustajajunia kulkee peräkkäin pienin vuorovälein ennen taukoa (Landex et al. 2006). Pysähdysajat asemilla ja odotusajat kohtaamispaikoilla voivat tällöin kasvaa erityisesti yksiraiteisilla rataosilla (Pachl 2002). Yleensä rytmittelyssä pyritään tasapainoon kapasiteetin käyttöasteen ja matkustajien tarpeiden välillä (Landex et al. 2006).

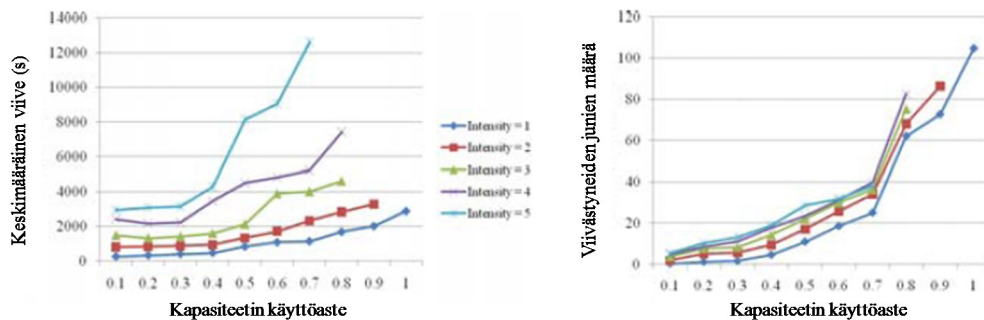
Ylitettyään tietyn raja-arvon, ratakapasiteetin käyttöasteen kasvu heikentää täsmällisyyttä eksponentiaalisesti (kuva 43). Tämä johtuu junavälien puskurijajan lyhenemisen aiheuttamasta viiveiden ketjuuntumisesta. (Landex 2008)



Kuva 43. Ratakapasiteetin käyttöasteen vaikutus täsmällisyyteen (Landex et al. 2006b).

Meng et al. (2011) tutkivat simuloimalla ratakapasiteetin käyttöasteen vaikutusta aikataulun luotettavuuteen. Simuloinneissa liikenne koostui tasapuolisesti huippunopeista ja nopeista matkustajajunista. Huippunopeat junat pysähtyivät vain merkittävillä ja nopeat junat kaikilla asemilla. Asemille asetettiin junien minimilähtö- ja saapumisaikaväleiksi 3 minuuttia. Junien ajoaikoihin ja niiden pysähdysaikoihin asemilla aiheutettiin häiriöitä tietyllä todennäköisyysfunktioilla.

Ratakapasiteetin käyttöasteen kasvaessa keskimääräinen viive piteni sitä enemmän, mitä intensiivisempiä häiriöt olivat (kuva 44). Käyttöasteen ollessa pieni, eivät primaariset viiveet juurikaan aiheuttaneet sekundaarisia viiveitä suurien puskuriaikojen takia. Käyttöasteen ylitettyä ensimmäisen kriittisen arvon (noin 0,4), sekundaariset viiveet kasvoivat selkeästi, mikä näkyy keskimääräisen viiveen kasvuna. Käyttöasteen ylitettyä toisen kriittisen arvon (noin 0,8), sekundaariset viiveet ja keskimääräinen viive kasvoivat räjähdysmäisesti puskuriaikojen ollessa liian pieniä. Viivästyneiden junien määrä kasvoi kutakuinkin samassa suhteessa kullakin häiriöintensiteetillä käyttöasteen kasvaessa. Viivästyneiden junien määrässä ei tapahtunut läheskään samanlaista kasvua häiriöintensiteetin kasvaessa kuin keskimääräisessä viiveessä.



Kuva 44. Häiriöiden intensiivisyyden vaikutus junien keskimääräiseen viiveeseen ja viivästyneiden junien määrään ratakapasiteetin eri käyttöasteilla (Meng ja Goverde 2011).

Norjan pääkaupunkiseudulla tehdyssä tutkimuksessa ratakapasiteetin käyttöaste ei yksin selittänyt täsmällisyyden vaihtelua. Ruuhka-aikana käyttöastetta enemmän vaikutusta täsmällisyyteen huomattiin olleen matkustajamäärällä. (Olsson ja Haugland 2004)

3.9.2 Ratakapasiteetin käyttöasteen määrittäminen

Ratakapasiteetin käyttöaste voidaan laskea UIC:n (2004) menetelmällä (kaava 9):

$$K = \frac{k \cdot 100}{U}, \text{ jossa} \quad (9)$$

K on ratakapasiteetin käyttöaste (%)
 k on liikennöinnin varaama kokonaisaika (min)
 U on tarkasteltava ajanjakso (min)

Liikennöinnin varaama kokonaisaika k lasketaan kaavalla 10:

$$k = A + B + C + D, \text{ jossa} \quad (10)$$

<i>A</i>	on rataosalla liikennöivien junien ajoaikojen summa tarkasteltavana ajanjaksona (min)
<i>B</i>	on pelivara
<i>C</i>	on junakohtauksista aiheutuva aikalisä yksiraiteisille rataosille (min)
<i>D</i>	on kunnossapidolle varattu aika (min)

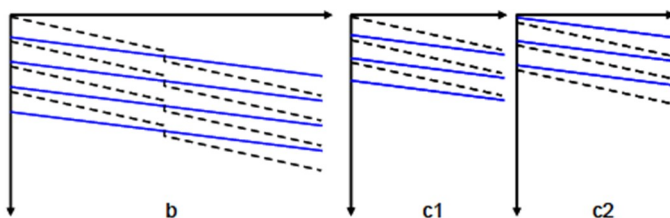
Ratakapasiteetin käyttöaste lasketaan molemmille suunnille erikseen. Laskemisessa oletetaan junien lähtevän liikkeelle minimiaikavälein, joten aikaviivat puristetaan yhteen ennen laskemista. Puristamisessa ei saa muokata junien ajo-, kohtaamis-, ohitus- ja pysähdysaikoja. Käyttöaste ja sille määritettävät raja-arvot riippuvat tarkasteltavasta ajanjaksosta. (UIC 2004)

UIC:n menetelmä soveltuu parhaiten kahden tai useamman aikataulun vertaamiseen ja rataverkon pullonkaulojen paikallistamiseen. Pitkäsien mukaan lähtötietojen kerääminen graafisesta aikataulusta on työlästä, ellei sitä tehdä automatisoiduilla työkaluilla.

Ratakapasiteetin käyttöaste pitää laskea junalinjan jokaiselle rataosalle erikseen. Korkeimman arvon saanut rataosa mitoitaa koko linjan. (UIC 2004.) Aikataulu pitää jakaa osiin solmukohtien, kohtaus- ja ohituspaikkojen sekä raidemäärän vaihtumiskohtien perusteella. Lisäksi linjat pitää jakaa osiin kohdissa, joissa junamäärä vaihtuu (esimerkiksi pääteasemat, joissa junat kääntyvät) ja asemilla, joissa on junaohituksia. (Landex et al. 2006b.)

Lyhyiden linjaosien suuri määrä ei ole eduksi sellaisen junalinjan ratakapasiteetin käyttöasteen tutkimisessa, jossa osa junista ajaa linjan loppuun ja osa kääntyy ympäri ennen pääteasemaa. Koko linjan käyttöaste pitää määrittää suurimman käyttöasteen saaneen linjaosan perusteella, jottei koko linjan junien lisäämismahdollisuutta tulkita väärin. Kapasiteetin laskeminen koko linjalle ei kuitenkaan aina ole mahdollista, minkä takia pitää analysoida, onko koko linjan käyttöaste järkevää määrittää linjaosien perusteella. (Landex et al. 2006b)

Junalinjan jakaminen osiin kohtaus- ja ohituspaikkojen perusteella myös vääristää todellisuutta. Vaikka hitaamman junan ohittaminen nopeamman junan toimesta tehostaa ratakapasiteetin hyödyntämistä käyttöasteen ollessa korkea, UIC:n menetelmällä laskettaessa käyttöaste pienenee jopa entisestään: ohitukseen varattu odotusaika ei tällöin sisälly laskentaan (kuva 45). (Landex et al. 2006b)

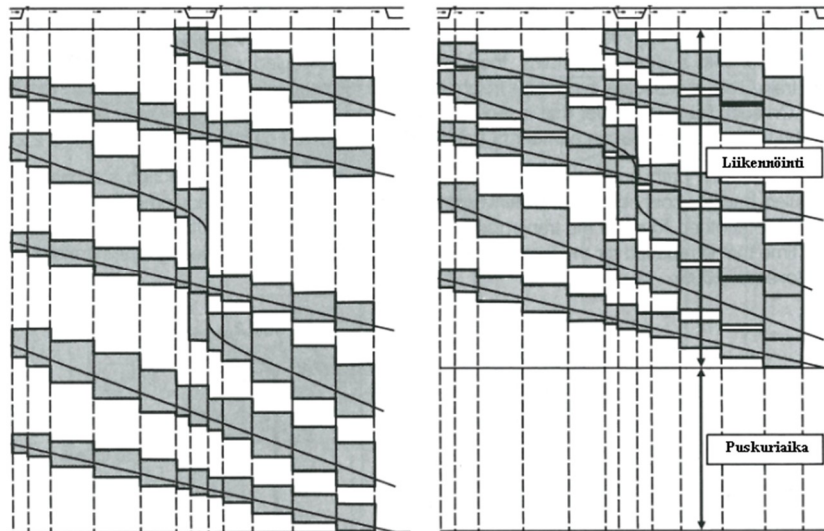


Kuva 45. Kohtaus- ja ohituspaikkojen perusteella tapahtuvan aikataulun jakamisen vaikutus ratakapasiteetin käyttöasteeseen UIC:n menetelmässä (Landex et al. 2006).

Ruotsissa kokemukset UIC:n menetelmän käytöstä ovat olleet positiivisia (Wahlborg 2005). Itäväälläkin menetelmä on havaittu hyväksi, mutta aikataulujen tiivistäminen

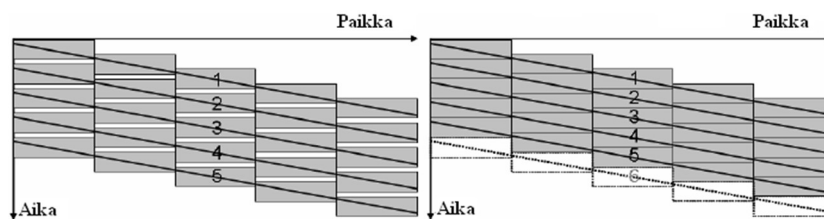
on todettu monimutkaiseksi etenkin paljon junakohtaamisia ja -ohituksia sisältävillä rataosilla (Höllmüller ja Klahn 2005).

Kuvassa 46 on esitetty aikataulun puristaminen kaksiraiteisen rataosan toisen suunnan osalta (Pachl 2008). Puristamista rajoittavat pisimpään varattuna olevat opastinvälit (Landex et al. 2006b). Kuvassa puskuriaika tarkoittaa käyttämätöntä ratakapasiteettia.

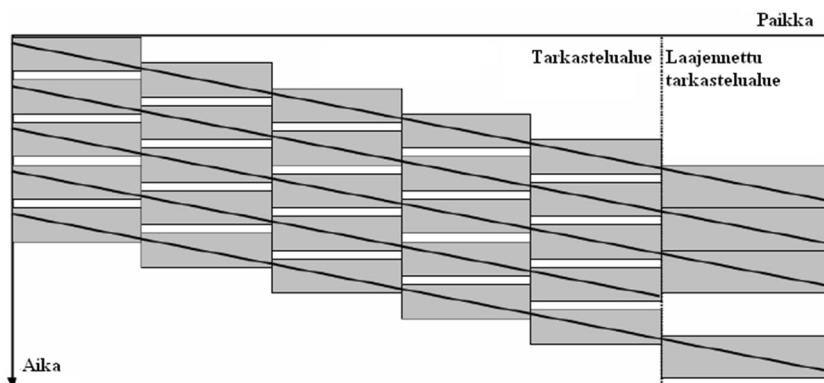


Kuva 46. Aikataulun puristaminen kaksiraiteisella rataosalla (Pachl 2008).

Kuva 47 esittää, kuinka aikatauluosan puristaminen mahdollistaa junan lisäämisen aikatauluun. Tarkastelualan laajentaminen saattaa estää lisäämisen (kuva 48). Tämän takia aikataulun osiin jakamisessa on oltava erityisen huolellinen (Landex et al. 2006b).



Kuva 47. Junan lisäämismahdollisuus aikataulun puristamisen jälkeen (Landex et al. 2006b).



Kuva 48. Tarkastelualan laajentamisen vaikutus aikataulun puristamiseen (Landex et al. 2006b).

3.10 Aikataulurakenne (vuoroväli ja aikataulun säännöllisyys)

3.10.1. Aikataulurakenne palvelutasotekijänä

Vuoroväli on tärkeä palvelutasotekijä erityisesti lähijunaliikenteessä, koska se vaikuttaa matkustajien odotus- ja vaihtoaikoihin. Etenkin satunnaisille matkustajille kysyntään pohjautuvat, tasaiset vuorovälit ovat eduksi. (Mukula 2008.) Vuorovälin pieneminen vähentää tarvetta suunnitella vaihtoyhteyksiä, koska matkustajalle löytyy todennäköisesti vaihtoyhteys tarpeeksi lyhyellä vaihtoajalla. Vuorovälin pienentyessä tietyn raja-arvon alle, ei matkustajan enää tarvitse käyttää aikataulua. (Vromans 2005.) Tutkimusten mukaan vuoroväli, jolla suurin osa matkustajista luopuu aikataulun käytöstä, on 5–12 minuuttia (Luethi et al. 2007).

Mitä pienempi keskihajonta aikataulun junaväleillä on, sitä säännöllisempi aikataulu on. Junalinjoja ja asemia voidaan myös painottaa niiden tärkeyden mukaan säännöllisyyden määrittämisessä. (Hansen 2010.) Säännöllisyyttä voidaan lisätä asettamalla saman väliaseman kautta eri pääteasemiin kerran tunnissa kulkevat junat pysähtymään väliasemalla puolen tunnin eikä esimerkiksi 15 ja 45 minuutin välein. (Peeters 2003.)

Vakioaikataulussa junat lähtevät ja saapuvat säännöllisin vuorovälein tietyllä vakio minuuttiluvulla. Siinä junalinjan kulkusuunnat ovat toistensa peilikuvia. Yleisimmin symmetriatuntina käytetään tasatuntia. Jos juna lähtee asemalta esimerkiksi 5 minuuttia yli tunti-luvun, toinen juna saapuu asemalle 5 minuuttia alle tunti-luvun. (Mäkitalo 2001.) Oksasen mukaan vakioaikataulu voidaan peilikuvamallin sijaan rakentaa myös vain yhteen suuntaan, kuten lähijunaliikenteen kohdalla usein tehdäänkin.

Vakioaikataulusta saadaan hyötyä, jos junavuorolla on vähintään 2 lähtöä tunnissa (Wardman et al. 2004). Lyhyet ja säännölliset vuorovälit mahdollistavat matkustajille tulemisen asemalle satunnaiseen aikaan. Saksalaisten tutkimusten mukaan vuorovälin lyhentäminen lisää matkustajamäärää vähintään samassa suhteessa. (Bosserhoff 2007.)

Vakioaikataulussa vuorovälin pienentäminen on helpompaa kuin perinteisissä aikatauluissa, joissa pienikin muutos saattaa heikentää aikataulun palvelutasoa tai vaikuttaa esimerkiksi jatkoyhteyksiin (Kroon et al. 2005). Vakioaikataulun vuorovälejä saadaan muutettua lisäämällä tai poistamalla junia kysynnän mukaan (Goverde 2005).

Vakioaikataulun varjopuolena on se, että asemat ovat usein täynnä tasatunteina. Vaihtoyhteydet toimivat tällöin parhaiten, mutta yhdenkin junan myöhästymisen voi vaikuttaa useaan junaan. (Liikennenvirasto 2010c.) Oksasen mukaan vakioaikataulurakenteen takia junien ajoaikoja saatetaan joutua nopeuttamaan paikoittain.

Vakioaikataulun solmuasemat ovat asemia, joiden läpi ajaa junia useaan suuntaan lähes samaan aikaan. Aikataulut on laadittava niiden ehdoilla, mikä vähentää aikataulujen joustavuutta ja lisää junien välisiä riippuvuuksia. Monen matkustajan vaihtoyhteydet kärsivät, jos junat eivät ole täsmällisiä solmuasemilla. (Mäkitalo 2001)

Matkustajalle vakioaikataulu on selkeä ja helppo muistaa. Säännöllisyyden ja symmetrian johdosta junat ovat samaan aikaan asemilla, mikä helpottaa säännöllisesti samanlaisena toistuvaa junavaihtoa. Lisäksi, vakioaikataulu pienentää vaihtoaikoja ja tehostaa ratakapasiteetin hyödyntämistä ja kaluston käyttöä. (Mäkitalo 2001)

Suomessa vakioaikataulurakenteen käyttämistä koko rataverkolla rajoittavat liikenteen pieni kysyntä tietyillä rataosilla ja yksiraiteisten rataosien pitkät junien kohta- ja ohituspaikkavälit. Etenkin Etelä-Suomen rataosilla sen käyttäminen edellyttää tavarajunaliikenteen yhteensovittamista matkustajajunaliikenteen kanssa, mikä vaatii joustoa molempiin suuntiin. (Mäkitalo 2001)

3.10.2. Aikataulun säännöllisyyden ja rakenteen määrittäminen

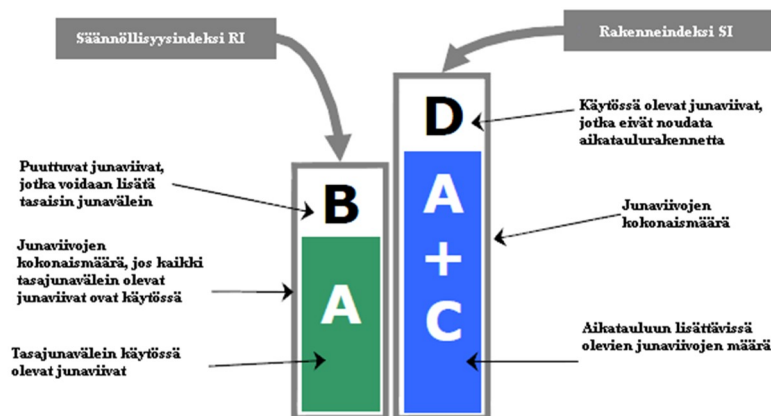
Tzieropouloksen ja Emeryn (2009) menetelmä määrittää aikataulun tai sen osan säännöllisyysindeksin RI (kaava 11) ja rakenneindeksin SI (kaava 12). Aikataulu on täysin vakio, kun ne saavat arvon 1. Kuva 49 havainnollistaa kaavoja 11 ja 12.

$$RI = \frac{A}{A+B}, \text{ jossa} \quad (11)$$

A on tasajunavälein käytössä olevat aikatauluviivat
 B on puuttuvat aikatauluviivat, jotka voidaan lisätä tasajunavälein

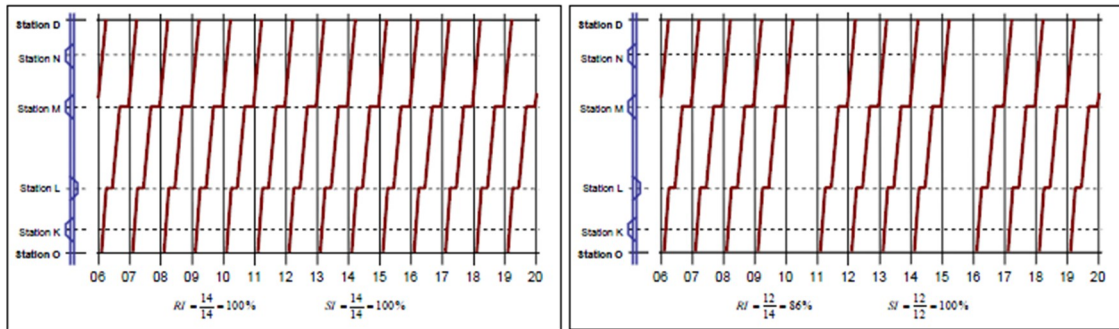
$$SI = \frac{A+C}{A+C+D}, \text{ jossa} \quad (12)$$

C on puuttuvat aikatauluviivat, jotka voidaan lisätä säilyttämättä tasajunavälejä
 D on käytössä olevat aikatauluviivat, jotka eivät noudata aikataulurakennetta

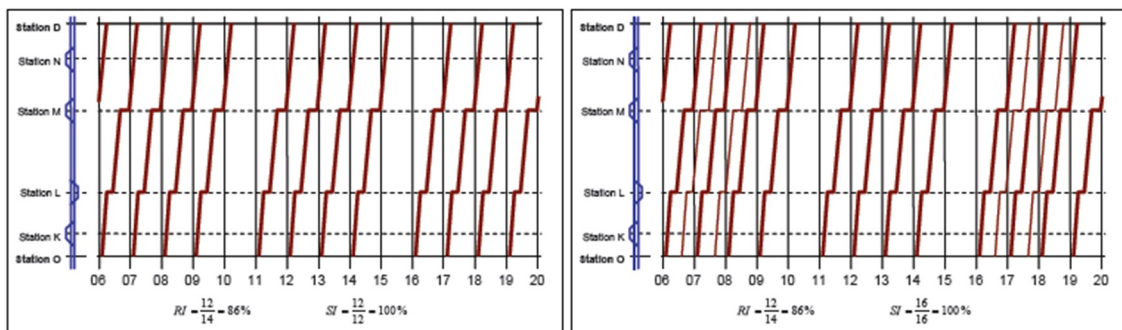


Kuva 49. Säännöllisyysindeksi RI ja rakenneindeksi SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).

Kuvat 50–54 havainnollistavat menetelmän käyttöä aikataululle, jossa on vain yksi, yhteen suuntaan kulkeva junalinja. Kuvan 50 tapauksessa aikataulu on täysin vakio. Poistamalla 2 ruuhka-ajan ulkopuoleista aikatauluviivaa (kello 10 ja 15), RI -arvo pienenee, mutta SI -arvo pysyy samana. Neljän aikatauluviivan lisääminen ruuhka-ajoille (6.30, 7.30, 16.30 ja 17.30) ei muuta indeksien arvoja (kuva 51).

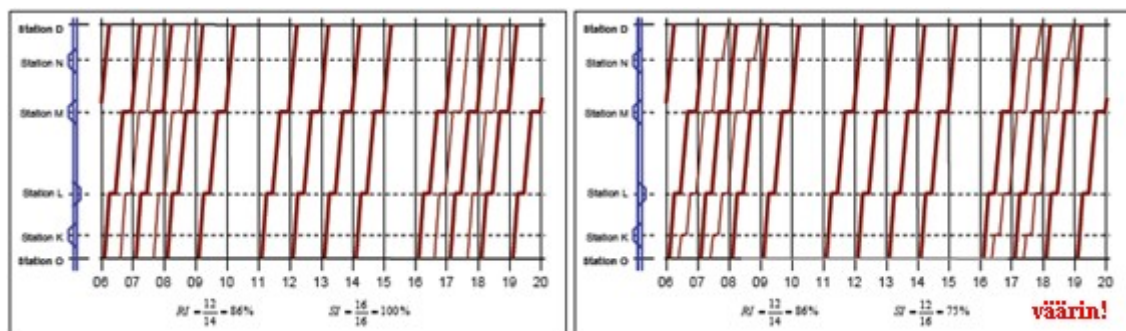


Kuva 50. Kahden ruuhka-ajan ulkopuolisen aikatauluviivan poistamisen vaikutus indekseihin RI ja SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).



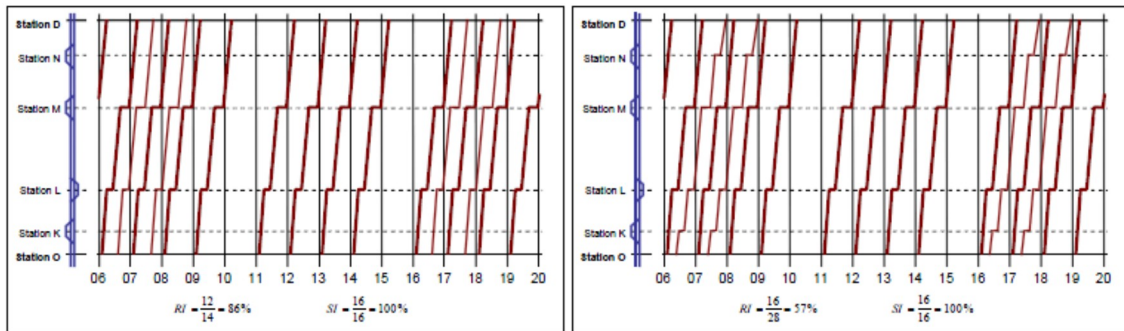
Kuva 51. Neljän aikatauluviivan ruuhka-ajoille lisäämisen vaikutus indekseihin RI ja SI (Tzieropoulos ja Emery 2009).

Kun 4 lisätylle aikatauluviivalle lisätään myös pysähdykset asemille K ja N, ne eivät enää noudata täysin vakioaikataulurakennetta (kuva 52): *SI*-arvo pienenee. Esimerkistä nähdään yksi menetelmän rajoitteista: todellisuudessa 4 lisättyä aikatauluviivaa ovat identtisiä ja ne voidaan asettaa kulkemaan uutena junalinjana. Niiden tulkitseminen aikataulurakennetta noudattamattomiksi aikatauluviivoiksi pienentää *SI*:tä virheellisesti.

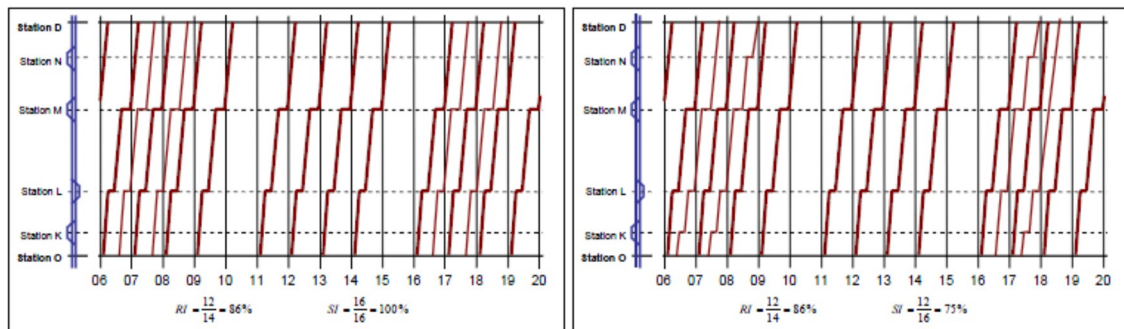


Kuva 52. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun 4 lisättyä aikatauluviivaa tulkitaan virheellisesti aikataulurakennetta noudattamattomiksi (Tzieropoulos ja Emery 2009).

Neljän lisätyn aikatauluviivan muodostama junalinja liikennöi vain ruuhka-aikana, minkä takia aikataulun säännöllisyys on sen osalta huono (vain 4 mahdollisesta 14 aikatauluviivasta on käytössä). Jos vaikutus laskettaisiin oikeaoppisesti, *RI*-arvo pienenesi *SI*-arvon sijaan (kuva 53). Kuva 54 havainnollistaa, kuinka 4 lisättyä aikatauluviivaa eivät noudata aikataulurakennetta silloin, kun niiden pysähdyskäyttötymiset eroavat toisistaan.



Kuva 53. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun neljä lisättyä aikatauluviivaa tulkitaan oikealla tavalla (Tzieropoulos ja Emery 2009).



Kuva 54. Vaikutus indekseihin RI ja SI, kun lisätään neljä aikataulurakennetta noudattamattonta aikatauluviivaa (Tzieropoulos ja Emery 2009).

Tzieropoloksen ja Emeryn (2009) mukaan vaaditaan asiantuntemusta, jotta osataan kaikissa tapauksissa erottaa toisistaan aikataulurakennetta noudattamattomat aikatauluviivat ja itsenäisen junalinjan säännönmukaiset aikatauluviivat. Tämän takia tämän työn tapaustutkimuksessa menetelmän käyttöä ei tutkittu.

3.11 Vaihtoyhteydet

Mahdollisimman monelle matkustajalle pitäisi lähtökohtaisesti tarjota suora yhteys, jos liikennejärjestelmästä halutaan mahdollisimman helppokäyttöinen (Mukula 2008). Etenkin vakioaikataulurakenteessa vaihtoyhteydet tekevät junien matka-ajoista usein tarvittavaa pidempiä junien välisten riippuvuuksien takia (Schittenhelm 2008).

Paljon pitkiä linjoja sisältävän aikataulun etuna on suorien yhteyksien lukumäärä. Vaihtoajan arvo on matka-ajan arvoa suurempi, eivätkä suorat yhteydet edellytä junavaihtoja. (Huisman et al. 2005.) Täten niihin ei myöskään sisälly riski menettää vaihtoyhteyttä junan myöhästymisen takia. Pitkät linjat toisaalta huonontavat aikataulun häiriösietoisuutta, koska mahdolliset viiveet ketjuuntuvat laajemmalle alueelle ja kestävät kauemmin. Pitkillä linjoilla myös matkustajamäärien vaihtelu on suurempaa, mikä johtaa huonompaan kustannustehokkuuteen. (Vromans 2005.)

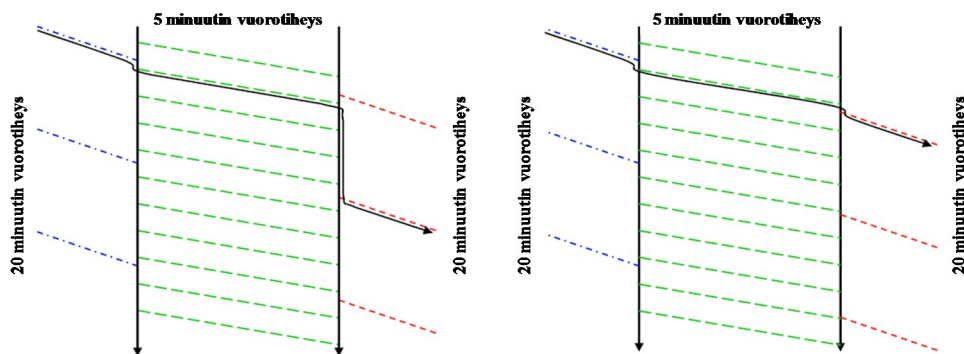
Matkustajat arvostavat vaihtoyhteyksien luotettavuutta erityisen paljon (Goverde 1998): niitä pidetään ajoaikaakin tärkeämpänä palvelutasotekijänä Tanskassa (Schittenhelm 2011). Lyhyt viive vaihtoketjun alussa muuttuu pitkäksi viiveeksi, jos matkustaja menettää vaihtoyhteyden (Rietveld et al. 2001). Oksasen mukaan Suomen lähijunaliikenteessä matkustajien junasta poistumiseen ja junaan nousemiseen

käyttämän ajan (10–60 sekuntia) keskihajonta ei ole syynä junien myöhästymisiin toisin kuin mahdollisesti kaukojunaliikenteessä.

Oksasen mukaan lähiliikenteen junat eivät pääsääntöisesti odota myöhässä olevaa junaa. Poikkeukselliset odotukset esiintyvät vain hiljaisina liikennöintiaikoina: muuten tiheästi liikennöivät junalinjat joutuisivat pois aikataulustaan ja viiveet ketjuuntuisivat. Kaukojunaliikenteessä odotukset ovat tavallisia myöhästymisten sattuessa, koska junavuoroja on vähän ja matkustajille pitää järjestää menetety vaihtoyhteyden tilalle korvaava kuljetus.

Mannerstömin mukaan Suomen rautatieliikenteessä junavaihtoja on usein kahden rataosalla samaan suuntaan kulkevan junan välillä, toisen niistä jäädessä asemalle: matkustajavirtojen epätasainen jakautuminen on syynä tähän.

Kuvassa 55 on esitetty sekä huonosti että hyvin suunnitellut vaihtoyhteydet 2 junavaihtoa sisältävälle matkaketjulle. Aikatauluissa on samat vuorovälit ja junamäärät. Vasemmanpuoleisen aikataulun jälkimmäistä vaihtoyhteyttä ei ole suunniteltu matkaketjun ehdoilla: vaihdettaessa pitkän vuorovälin junalinjasta lyhyen vuorovälin junalinjaan, ei matkustajan matka-aika lyhene, vaikka lähtö tapahtuisi saapumishetkestä lukien 1. mahdollisella junalla 4. mahdollisen junan sijaan. Toisaalta, saapuva juna voi olla varsin paljon myöhässä ilman, että matka-aika pitenee. Oikeanpuoleisessa aikataulussa molempien vaihtoyhteyksien odotusaika on lyhyt vaihdettaessa 1. mahdolliseen junaan. Jos saapuva juna on myöhässä, matka-aika todennäköisesti kasvaa yhtä pitkäksi kuin vasemmanpuoleisessa aikataulussa. (Landex 2008)



Kuva 55. Huonot ja hyvät vaihtoyhteydet kahden junavaihdon matkaketjulle (Landex 2008).

3.12 Kalustokierto

Kalustokierto kuvaa, miten junakalusto on sidottu aikataulun aikatauluviivoihin. Sen suunnittelu on oleellinen osa aikataulusuunnittelua junien välisten riippuvuuksien takia. (Goverde 2005.) Moni kalustokiertoon liittyvä ominaisuus on suora seuraus aikataulurakenteesta, mutta kaikkia niistä ei voida nähdä etukäteen (Vromans 2005).

Pitkäsen mukaan kalustokierron tehostaminen vähentää junien odotusaikoja ratapihoilla. Se myös laskee kalustokustannuksia (Peeters 2003), mutta nostaa viiveiden ketjuuntumisen todennäköisyyttä: aikataulun lähdöistä suurempi määrä tehdään tällöin saapuvalla junalla (Liikennevirasto 2010c). On yleistä, että juna kääntyy ja jatkaa matkaansa vastakkaiseen suuntaan (Peeters 2003). Jos pääteasemalle saapuva juna on

myöhässä kääntöajan kestoja enemmän, junan lähtökin viivästyy. Jos saapuvasta junasta käytetään kalustoa useampiin juniin, viiveet leviävät vielä laajemmalle. (Mukula 2008.)

Juna voi kulkea enemmän kuin yhdellä linjalla päivän aikana (Peeters 2003), mikä on Pitkäsén mukaan Suomessa tyypillistä. Tällöin mahdolliset häiriöt siirtyvät junalinjalta toiselle kaikkein herkimmin (Mukula 2008). Jos myöhästyneelle junalle ei ole korvaavaa kalustoa, sen henkilöstölle varahenkilöstöä tai henkilöstön vuorojen vaihtaminen ei onnistu, lähtevä junavuoro jää Helanderin mukaan ajamatta. Ruuhka-ajan ulkopuolella osa junista on siirrettävä järjestelypihoille odottamaan seuraavaa lähtöään (Peeters 2003).

Osittain tai kokonaan samalla reitillä kulkevien junalinjojen junat voidaan yhdistää tai erottaa toisistaan väliasemalla ratakapasiteetin ja kalustokustannusten säästämiseksi. Jos lähtöasemalta pääteasemalle mentäessä junat erotetaan, yhdistetään ne toisiinsa vastakkaiseen suuntaan kuljettaessa. Sama pätee myös toisinpäin. (Peeters 2003)

Junien yhdistämisen ja erottamisen käyttökelpoisuus riippuu tilanteesta. Niillä on usein hättävää vaikutuksia: vuorovälit kasvavat ja vaihtoyhteydet huononevat. (Yauan ja Hansen 2007, Liikennevirasto 2010c.). Lisäksi, junien väliset riippuvuudet lisääntyvät ja matka-ajat pitenevät (Peeters 2003). Hovin mukaan yhdistäminen toisaalta säästää ratakapasiteettia poistuvan junavuoron ansiosta. Yhdistäminen on myös erottamista nopeampaa. Suomessa junien yhdistetään ja erotetaan nykyään harvoin: Mannerströmin mukaan muut suunnitteluratkaisut ovat ajaneet edelle.

Helanderin mukaan osa junavaunuista saatetaan irrottaa ja kiinnittää toiseen veturiin, jos osa matkustajista jatkaa matkaansa toiseen suuntaan väliasemalta. Jos irrotusvaihe kestää liian kauan, viiveestä kärsii sekä saapunut että lähtevä juna. Samalla viiveiden ketjuuntumisen riski kasvaa. Hovin mukaan valtaosa Suomen nykyisestä kaukojunakalustosta ei sovellu junakokoonpanojen nopeaan muuttamiseen (yhdistämiset ja erottamiset) matkan aikana. Toimivilla automaattikytkimillä varustettuja junayksiköitä voidaan yhdistää ja erottaa suoraan ajamalla, jolloin kokoonpano on lähtövalmis vain muutaman minuutin kuluttua toimenpiteen aloittamisesta.

4 TUTKIMUSMATERIAALIT JA MENETELMÄT

4.1 Asiantuntijahaastattelut ja asiantuntijoiden vastaukset kysymyslomakkeeseen

Rautatieliikenteen osapuolilla on aikataulusuunnittelussa sekä yhteisiä että ristiriitaisia prioriteetteja. Ne on huomioitava kattavasti aikataulujen arvioinnissa ja kehittämisessä, jotta suunnittelu olisi mahdollisimman paljon yhteisten etujen mukaista. (Schittenhelm 2011). Analyyttistä hierarkiaprosessia hyödyntävä aikatauluvaihtoehtojen arviointikehikko on mahdollinen vastaus kyseiseen tarpeeseen.

Aikataulujen arviointikehikon luomista varten Suomen rautatieliikenteen osapuolten asiantuntijoita haastateltiin palvelutasotavoitteiden selvittämiseksi huhti- ja toukokuussa 2011. Haastatellut henkilöt on listattu seuraavassa osapuolittain; tarkat tiedot löytyvät lähdeluettelon lopusta:

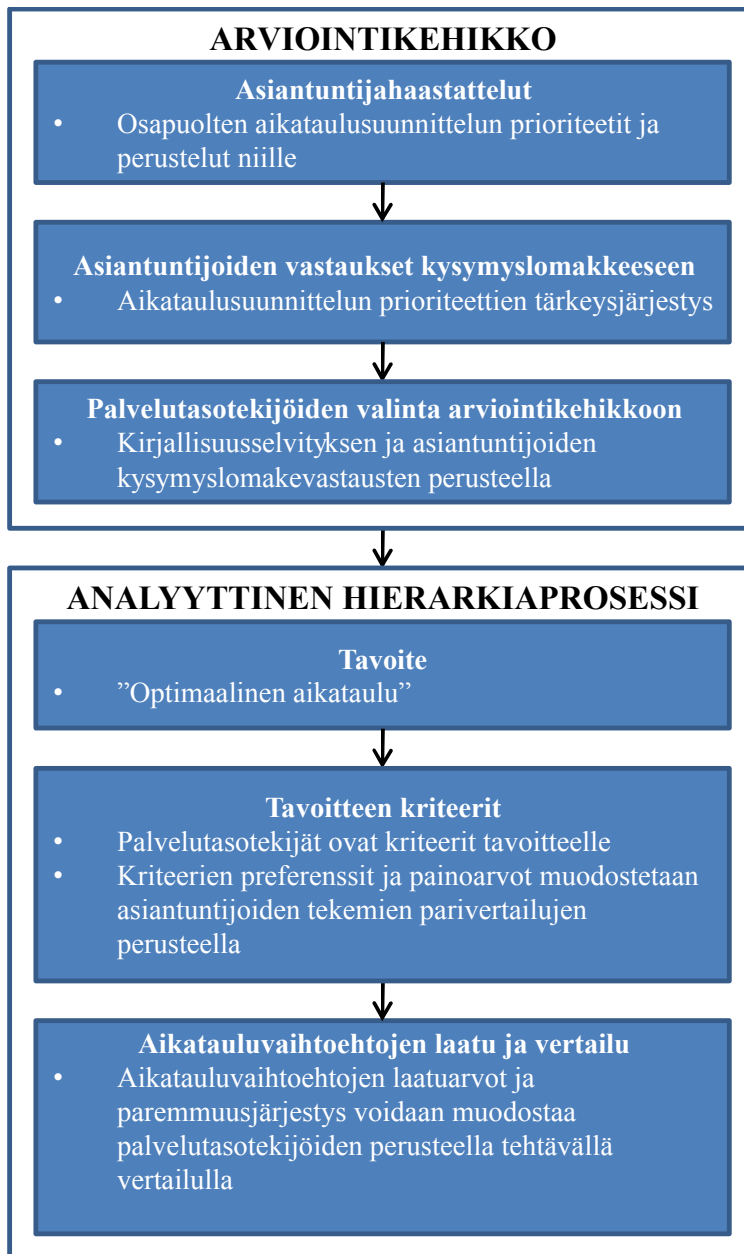
- Rauno Helander, Liikenneviraston rataliikennekeskus
- Sami Hovi, Herbert Mannerström, Jarmo Oksanen ja Henri Pekonen, VR matkustajajunaliikenne
- Tero Kosonen, VR tavarajunaliikenne
- Ville Lehmuskoski, HSL
- Pekka Iikkanen, tavaraliikenteen konsultti.

Lisäksi asiantuntijoita pyydettiin valitsemaan tärkeysjärjestyksessä 5 prioriteettia kysymyslomakkeen luettelosta (Liite B). Asiantuntijoilla oli myös mahdollisuus nimetä prioriteetti, joka ei ollut luettelossa. Lisäksi heiltä pyydettiin perustelut valintoihinsa. Asiantuntijat vastasivat subjektiivisesti joko tavarajunaliikenteen tai matkustajajunaliikenteen näkökulmasta; matkustajaliikenne korostui vastauksissa. Prioriteettivalintojen perusteella valittiin kriteerit aikataulun arviointikehikolle (luku 5.3.6). Haastatteluista ja kysymyslomakkeen vastauksista saatu tieto osapuolille tärkeistä palvelutasotavoitteista ja aikataulusuunnittelun prioriteeteista on esitetty luvussa 5.

Matkustajajunaliikenteen ja tavarajunaliikenteen prioriteeteiksi haastattelujen perusteella saatujen palvelutasotekijöiden tärkeysjärjestyksen ja palvelutasotekijöiden kirjallisuusselvityksen perusteella valittiin arviointikehikkoon kriteereiksi tärkeimmät aikataulusuunnittelua kokonaisvaltaisesti ohjaavat palvelutasotekijät. Asiantuntijoita pyydettiin tämän jälkeen tekemään niille AHP:n mukaiset parivertailut (luku 6.1).

4.2 Arviointikehikko

Vertaamalla aikatauluvaihtoehtoja kriteerien perusteella AHP:lla saatuja painoarvoja käyttäen, voidaan määrittää niiden keskinäinen tärkeysjärjestys aikataulun palvelutasotavoitteelle. Kriteerien arvot mitataan aikatauluista joko suoraan tai määritetään soveltuvalla analyttisellä menetelmällä. Arviointikehikon muodostamiseen vaaditut toimenpiteet ja aikatauluvaihtoehtojen vertailu AHP:lla on esitetty kuvassa 56.



Kuva 56. Arviointikehikko ja analyttinen hierarkiaprosessi.

4.3 Analyttinen hierarkiaprosessi ja asiantuntijoiden tekemät parivertailut

4.3.1 Analyttisen hierarkiaproessin kuvaus

AHP on käytännöllinen ja suosittu monikriteerinen päätöksentekomenetelmä. Siinä päätöksenteon tavoitteet, kriteerit ja vaihtoehdot esitetään hierarkiana: tavoite on ylimmällä tasolla, sen kriteerit seuraavalla tasolla ja vaihtoehdot alimmalla tasolla. AHP perustuu parivertailuihin, jotka tehdään kaikkien hierarkiatasolla olevien tekijöiden kesken niitä ylemmällä hierarkiatasolla olevan yhteisen tavoitteen tai kriteerin suhteen: kriteereitä verrataan keskenään suhteessa tavoitteeseen niiden keskinäisten preferenssien ja painoarvojen muodostamiseksi. Vaihtoehtoja puolestaan verrataan keskenään sen perusteella, kuinka hyviä ne ovat kriteerien suhteen. Vertaitavat tekijät voivat olla kvantitatiivisia tai kvalitatiivisia. (Saaty 1990, Triantaphyllou et al. 1995)

Seuraava esimerkki havainnollistaa AHP:n käyttökelpoisuutta. Jos tavoitteena on ostaa tietokone, voi kriteereinä olla tietokoneen ominaisuuksiin liittyviä tekijöitä: hinta, prosessorin nopeus, muistikapasiteetti, kiintolevyn koko ja niin edelleen. Kokoonpanovaihtoehdot sisältävät samat tekijät, mutta niiden arvot vaihtelevat. Vaihtoehdoille halutaan löytää paremmuusjärjestys, mikä edellyttää sekä kriteerien että vaihtoehtojen parivertailuja. Kriteerit ovat usein keskenään ristiriitaisia: halvassa tietokoneessa ainakin jokin sen komponenteista on suorituskyvyltään huonompi kuin kalliissa tietokoneessa. (Triantaphyllou et al. 1995)

AHP:lla saadut tulokset riippuvat päätöksentekijän johdonmukaisuudesta, sisäisestä arvojärjestelmästä ja kokemuksesta (Saaty 1990). Ne ovat suuntaa antavia ja tukevat päätöksentekoa. Varsinkin painoarvojen ollessa lähellä toisiaan, päätöksentekoa on punnittava hyvin tarkasti. Tällöin voidaan sisällyttää enemmän tai vähemmän kriteereitä painoarvojen eron lisäämiseksi. (Triantaphyllou et al. 1995.) Seuraavaksi kuvataan AHP:n toiminta, perustuen lähteisiin Triantaphyllou et al. (1995) ja Saaty (1990).

Kriteerien parivertailussa päätöksentekijä määrittää valmiin sanallisen suhdeasteikon (taulukko 3) perusteella niiden keskinäisen paremmuuden tavoitteen suhteen. Samalla tavalla parivertailut tehdään vaihtoehdoille kunkin kriteerin suhteen.

Taulukko 3. AHP:n suhdeasteikko

Sanallinen arvio	Lukuarvo
Kriteeri 1 on yhtä tärkeä kuin Kriteeri 2	1
yhtä tärkeän ja hieman tärkeämmän väliltä	2
Kriteeri 1 on hieman tärkeämpi kuin Kriteeri 2	3
hieman tärkeämmän ja selkeästi tärkeämmän väliltä	4
Kriteeri 1 on selkeästi tärkeämpi kuin Kriteeri 2	5
selkeästi tärkeämmän ja paljon tärkeämmän väliltä	6
Kriteeri 1 on paljon tärkeämpi kuin Kriteeri 2	7
paljon tärkeämmän ja erittäin paljon tärkeämmän väliltä	8
Kriteeri 1 on erittäin paljon tärkeämpi kuin Kriteeri 2	9

Parivertailu matriisiin (taulukko 4) kukin tekijä on itseensä nähden tasa-arvoinen. Matriisin lävistäjän yläpuolinen kolmio muodostuu suoraan kunkin parivertailun preferenssistä r_{ij} . Sen alapuoliseen kolmioon täytetään yläkolmiosta käänteisluvut $1/r_{ij}$.

Taulukko 4. AHP:n vertailumatriisi

	A_1	A_2	A_3	...	A_n
A_1	1	r_{12}	r_{13}	...	r_{1n}
A_2	$1/r_{12}$	1	r_{23}	...	r_{2n}
A_3	$1/r_{13}$	$1/r_{23}$	1	...	r_{3n}
...	1	...
A_n	$1/r_{1n}$	$1/r_{2n}$	$1/r_{3n}$...	1

Matriisin tekijöille lasketaan normalisoidut painoarvot seuraavasti: kunkin solun arvo jaetaan sitä vastaavan sarakkeen kaikkien solujen arvojen summalla, ja saadut arvot

lasketaan yhteen kunkin rivin kohdalla. Nämä arvot jaetaan vastaavan rivin solujen arvojen summalla. Painoarvoja voidaan käyttää suoraan kriteerien ja vaihtoehtojen vertailussa, koska se perustuu samaan asteikkoon.

AHP:ssa parivertailuille sallitaan pieni epäjohdonmukaisuus: ihmisten ei oleteta yleensä kykenevän tekemään täysin johdonmukaisia päätöksiä. Jos $A_i:n$ ja $A_j:n$ välinen painosuhte on 3 ja $A_j:n$ ja $A_k:n$ 3, pitäisi $A_i:n$ ja $A_k:n$ välisen painosuhteen olla 9, joka on AHP:n suhdeasteikon yläraja. Esimerkin arvojen ollessa esimerkiksi 3 ja 5, ei niiden tuloa vastaava painoarvo ole edes mahdollinen; AHP huomioi tämän logiikassaan. Johdonmukaisuussuhde CR , jonka hyväksyttävä arvo on yleensä 0,10 tai vähemmän, lasketaan kaavalla 13 ja johdonmukaisuusindeksi CI kaavalla 14:

$$CR = \frac{CI}{RCI}, \text{ jossa} \quad (13)$$

CI on johdonmukaisuusindeksi
 RCI on satunnaisindeksi

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \text{ missä} \quad (14)$$

λ_{\max} on matriisin ominaisarvo
 n on vaihtoehtojen määrä

Matriisin ominaisarvo λ_{\max} lasketaan kertomalla keskenään kunkin tekijän normalisoidun painoarvon ja kyseistä tekijää vastaavan sarakkeen solujen arvojen summat ja summaamalla kyseiset tulot. Satunnaisindeksi RCI saadaan taulukosta 5. Kriteerien ja vaihtoehtojen kokonaispainoarvo W lasketaan lopuksi kaavalla 15.

Taulukko 5. AHP:n satunnaisindeksit

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

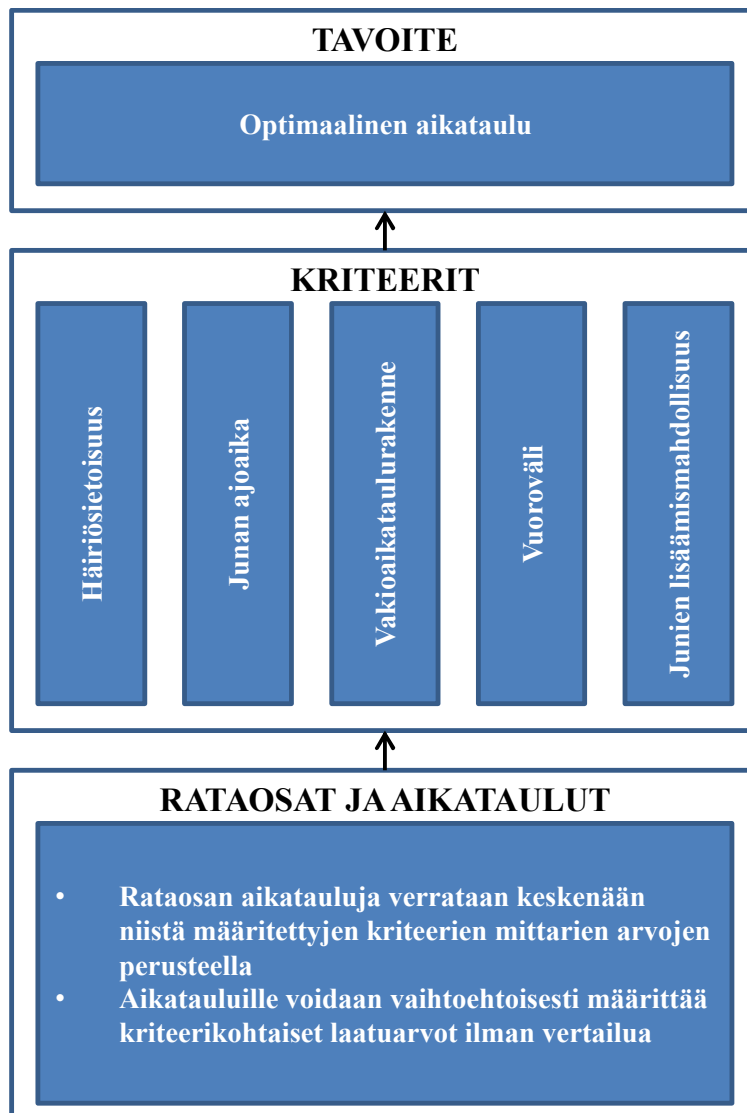
$$W = \sum A_i V_i^i, \text{ jossa} \quad (15)$$

A_i on kriteerin i normalisoitu painoarvo tavoitteen suhteen
 V_i^i on vaihtoehdon i normalisoitu painoarvo kriteerin i suhteen

Vaihtoehtoille voidaan kaavassa 15 käyttää V_i^i :n sijaan arvoasteikkoa, jolloin kriteereille määritetään laatu-arvot sen perusteella. Tätä työtä ajatellen molemmat menetelmät edellyttävät lisätutkimuksia palvelutasotekijöiden sisäisistä arvoasteikoista – varsinkin, kun laatu-arvo ei yleensä muutu lineaarisesti niissä – jotta aikatauluvaihtoehtoja voitaisiin verrata yksiselitteisesti ja johdonmukaisesti. Tämän takia työssä ei lasketa aikatauluvaihtoehtoille kokonaispainoarvoa W eikä myöskään kriteerien laatu-arvoja, vaan analysoidaan aikatauluja niistä mitattavien ja määritettävien palvelutasotekijöiden perusteella.

4.3.2 Kriteerien preferenssien ja painoarvojen muodostaminen

AHP:n mukaisesti rakennetun arviointikehikon hierarkia on esitetty kuvassa 57.



Kuva 57. AHP:n mukainen arviointikehikon hierarkia.

Optimaalinen aikataulu on tavoite, joka muodostuu hierarkian seuraavalla tasolla olevien kriteerien perusteella. Kriteeristö koostuu viidestä eri palvelutasotekijästä, joiden preferenssit ja painoarvot määräytyvät asiantuntijoiden tekemien parivertailujen perusteella. Luvun 4.3.1 lopussa kuvatulla tavalla voidaan aikatauluille a) muodostaa painoarvot vertaamalla niitä keskenään kriteerien mittarien arvojen perusteella tai b) vaihtoehtoisesti määrittää kriteerikohtaiset laatuarvot ilman vertailua.

Parivertailussa määritetään kriteerien keskinäinen preferenssi tavoitteen toteutumisen suhteen luvussa 4.3.1 kuvatulla tavalla. Aikataulun optimaalisuudella tarkoitetaan kokonaisvaltaisesti hyvää aikataulua, jossa ei erikseen painoteta matkustaja- tai tavarajunaliikennettä; asiantuntijoiden tehtävänä oli miettiä rautatieliikennettä ja sen aikataulusuunnittelua yleisesti valitsemastaan näkökulmasta. Kriteerit määriteltiin mahdollisimman yksiselitteisesti (liite C.1), jotta asiantuntijoiden parivertailut olisivat

keskenään vertailukelpoisia. Parivertailuissa Kullekin kriteerille laskettiin painoarvo ja vastausten johdonmukaisuus CR , painoarvojen ja johdonmukaisuuden aritmeettiset keskiarvot ka ja keskihajonta σ asiantuntijoiden tekemien parivertailuiden perusteella (luku 6.1, taulukko 6). Asiantuntijakohtaiset parivertailutaulukot löytyvät liitteestä C.2.

4.4 Tapaustutkimuksen tavoitteet ja kuvaus

Tapaustutkimuksella haluttiin varmistaa, että muutokset aikataulun junaväleissä ja junien nopeuseroissa muuttavat liikenteen heterogeenisuuden mittarien ($SSHR$ ja $SAHR$) arvoja johdonmukaisesti ja loogisesti. Lisäksi pyrittiin todentamaan olettamus heterogeenisuuden ja muiden mittarien välisestä riippuvuudesta: sekä junamäärän kasvu että junien lisäämismahdollisuuden väheneminen kasvattavat $SSHR$ - ja $SAHR$ -arvoja. Se tarkoittaisi viime kädessä $SSHR$:n ja $SAHR$:n soveltuvan aikatauluvaihtoehtojen häiriösietoisuuksien arviointiin: kirjallisuusselvityksessä todettiin häiriösietoisuudella olevan negatiivinen korrelaatio junamäärän ja ratakapasiteetin käyttöasteen kanssa, joiden kasvaessa korrelaatio voimistuu. Kun ne ovat ylittäneet tietyt raja-arvot, kasvun jatkuessa häiriösietoisuuden heikkeneminen voimistuu.

Häiriösietoisuus on rautatieliikenteen asiantuntijoiden mukaan aikataulun tärkein palvelutasotekijä; jos tapaustutkimuksella löydetään selkeä yhteys sen ja liikenteen homogeenisuuden välille, aikataulusuunnittelussa on perusteltua kiinnittää paljon huomioita homogeenisuuteen. Sen merkitys riippuu kuitenkin tilanteesta, ja suunnittelun muihinkin tärkeisiin prioriteetteihin pitää pystyä vastaamaan niiden painoarvojen ja hyväksytyjen raja-arvojen puitteissa. Tämän takia suunnittelussa on tärkeä tunnistaa a) missä tilanteissa ja b) kuinka paljon homogeenisuuteen pitää pyrkiä.

Aikatauluille laskettiin liikenteen heterogeenisuuden mittarien arvot, junamäärä ja yleensä myös junien lisäämismahdollisuus sekä siihen ja junamäärään perustuvan mittarin arvo. Lisäksi tutkittiin, miten heterogeenisuus riippuu muista tekijöistä; regressiokäyrät ja selitysasteet laskettiin tapaustutkimuksessa tarkasteltujen riippuvuusparien havaintopisteet kootusti esittäville kuvaajille (luku 7.2).

Aikataulut, junatyypit ja junien lähtö- ja saapumisaikavälit löytyvät liitteistä D.1–14. Alkuperäiset aikataulut ovat vuoden 2011 toukokuun arkipäivätauluja. Niissä olevat katkoviivoitetut aikatauluviivat ovat lisätavarajunia, joista tarkasteluun otetut on ympyröity.

Toisin kuin junaväli, vuoroväli ei ole aikataulun tekninen palvelutasotekijä, ja se kätkee tietoa aikataulun junatiheydestä. Junavälit tulevat lasketuksi liikenteen heterogeenisuuden määrittämisen yhteydessä. Junien ajoajat nähdään aikataulusta, mutta niitä ei tutkittu: vertailtavissa aikatauluvaihtoehtoisissa toisiaan vastaavien junalinjojen nopeudet olivat käytännössä samoja, eikä vaihtoehtoisia aikatauluja rakennettaessa junien ajonopeuksia muutettu.

$SSHR$ - ja $SAHR$ -mittarit laskettiin Vromansin et al. (2004) menetelmällä (luku 3.7.2). Jos junien välillä oli junaohitus, laskettiin mukaan ohituksen saapumis- ja lähtöaikaväli. Junien lisäämismahdollisuus perustui 4 minuutin minimijunaväliin, joka on jätävä kahden aikatauluviivan väliin lähtö- ja saapumisasemien välisellä matkalla. Lisättävän viivan on myös kokonaan mahdollista tarkasteltavalle aikavälille. Sellaisia

junalisäyksiä, jotka edellyttävät junaohitusta, ei otettu tarkasteluun. Tutkitut rataosat ja aikataulut on kuvattu seuraavassa.

A) *Kullasvaara–Luumäki* kuuluu Kouvola–Luumäki-rataosaan, joka on yksi Suomen vilkasliikenteisimmistä. Kullasvaara–Luumäen junista suurin osa on tavarajunia. VR suunnittelee sille vakioaikataulurakenteen käyttöönottoa, ja suunnittelun tueksi haluttiin antaa tietoa nykyisestä aikataulurakenteesta.

B) *Lahti–Kouvola* on matkustajamäärältään pääradan jälkeen Suomen liikennöidyin rataosa. Sen molemmilla suunnilla liikennöi matkustaja- ja tavarajunia sopivassa suhteessa. Junien nopeuseroissa ja junaväleissä on tapaustutkimusta varten sopivasti hajontaa aikavälien ja suuntien kesken.

C) Peräkkäiset rataosat *Karjaa–Salo–Kupittaa* otettiin mukaan tarkasteluun, jotta saataisiin vertailutuloksia erittäin pienen liikennesuoritteen rataosista. Rataosat ovat ainoat yksiraiteiset koko tapaustutkimuksessa.

D) Peräkkäisillä rataosilla *Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi* liikennöi molempiin suuntiin jonkin verran kaukojunia ja paljon lähijunia. Tässäkin aikataulussa on tapaustutkimusta varten sopivasti hajontaa liikenteen heterogeenisuudessa ja junamäärissä rataosien ja suuntien kesken.

E) *Oulunkylä–Kerava*-rataosa on osa Suomen päärataa. Sillä liikennöi molempiin suuntiin paljon kauko- ja lähijunia. Kuten Lahti–Kouvola- ja Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-aikatauluissakin, liikenteen heterogeenisuudessa ja junamäärissä on sopivasti hajontaa aikavälien ja suuntien kesken.

F) Jotta saataisiin paras mahdollinen käsitys puskurijakson pituuden vaikutuksesta *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien arvoihin, tarkastelua varten rakennettiin 4 vaihtoehtoista aikataulua; sellaisia, joissa on tietyn pituinen puskurijakso ja sellaisia, joissa puskurijaksoa ei ole. Yhtä lukuun ottamatta kaikissa tapauksissa junamäärä ja junien nopeudet olivat samoja. Aikatauluja puristettaessa siirrettiin kaikkia paitsi ensimmäistä saapuvaa aikatauluviivaa, ensimmäistä kokonaan aikavälillä olevaa aikatauluviivaa ja viimeistä lähtevää aikatauluviivaa. Tarkasteluun otettiin mukaan myös mahdollisimman homogeeninen, paljon junia sisältävä aikataulu (Helsinki–Riihimäki-rataosalta *Kerava–Tikkurila*-väli) ja sen minimijunaväleihin puristettu, puskurijakson sisältävä vaihtoehto niiden keskinäistä vertailua varten. Aikaväli valittiin niin, että heti sen alussa oli saapuva juna ja aivan lopussa lähtevä juna. Aikataulua puristettaessa siirrettiin kaikkia paitsi niitä aikatauluviivoja, jotka eivät kokonaan ole tarkasteluajavälille.

G) *Helsinki–Kerava*-rataosan aikaväli 15.30–19.30 valittiin tarkasteluun, koska siinä on valmiiksi vakioaikataulurakenne ja paljon kauko- ja lähijunia. Vertailua varten kyseinen aikataulu muokattiin mahdollisimman tasaisesti junaväleihin perustuvaksi aikatauluksi, siirtämällä aluksi kaukojunat ja sen jälkeen lähijunat. Vastakkainen suunta muokattiin tämän jälkeen jokseenkin aikataulurakenteiden välimuodoksi, samaa junien siirtojärjestystä noudattaen.

H) Lahti–Kouvola-rataosan *Kouvola–Lahti*-suunnan aikaväli 7.00–12.00 valittiin aikataulupohjaksi, koska sillä liikennöi sekaisin matkustaja- ja tavarajunia merkittävästi

nopeuseroilla. Tavarajunien määrä tuplattiin lisäämällä niitä junanopeuksilta alkuperäisen suhteen mukaisesti. Molemmissa aikatauluvaihtoehdoissa on junanopeuksiltaan vastaaville tavarajunille sama määrä samanlaisia junaohituksia. Toisessa vaihtoehdossa *priorisoitiin matkustajajunaliikenne*, toisessa *tavarajunaliikenne*

Matkustajajunaliikenteen priorisoivassa aikataulussa matkustajajunien aikatauluviivoja ja alkuperäisiä tavarajunien aikatauluviivoja ei siirretty. Lisätavarajunat asetettiin valmiiden aikatauluviivojen sijaintien perusteella siten, että niiden lähtö- ja saapumisaikaväleistä viereisiin juniin tulisi mahdollisimman suuria; kolmelle niistä asetettiin junaohitus Uusikylän ohituspaikalle.

Tavarajunaliikenteen priorisoivassa aikataulussa tavarajunat asetettiin mahdollisimman tasaisin välein toisistaan, kuitenkin niin, että matkustajajunat saatiin sovitettua niiden kanssa. Kahta ensimmäistä matkustajajuna- ja viimeistä matkustaja- ja tavarajunan aikatauluviivaa ei siirretty. Tavarajunille asetettiin junaohitus Niinimäen ohitus- ja kohtauspaikalle (lähempänä rataosan alkua kuin Uusikylä). Molemmissa aikatauluissa tavarajunan sai ohittaa vain yksi matkustajajuna.

5 SUOMEN RAUTATIELIIKENTEEN OSAPUOLET JA PALVELUTASOTAVOITTEET

5.1 Osapuolet

Suomen rautatieliikenteen keskeiset osapuolet ovat

- Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM)
- Kilpailuvirasto
- Liikennevirasto
- Liikenteen turvallisuusvirasto TraFi
- VR Group Oy (VR)
- Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä (HSL)
- Pääkaupunkiseudun Junakalusto Oy
- radanpidon suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitopalveluja tarjoavat yritykset. (Mukula 2008)

LVM vastaa rautatieasioista valtioneuvostotasolla, hallinnoi ratainfrastruktuurin ja radanpidon määrärahoja ja toimii rautatieliikenteen toimilupaviranomaisena. Rautatiemarkkinoiden kilpailun valvojana ja edistäjänä toimii kauppa- ja teollisuusministeriön alainen Kilpailuvirasto. (Mukula 2008)

Radanpitäjänä ja toisena rautatieviranomaisena toimii LVM:n alainen Liikennevirasto, joka vastaa rataverkon infrastruktuurista, ylläpidosta ja kehittämisestä, liikenteenohjauksesta ja ratakapasiteetin jakamisesta. Se ostaa ratatyöt, kiinteistönhoidon ja liikenteenohjauksen ulkopuolisilta yrityksiltä. (Mukula 2008)

Liikenteen turvallisuusvirasto TraFi

- säätelee rautatiealaa ja valvoo sen toimijoiden toimintaedellytysten tasapuolisuutta ja syrjimättömyyttä
- ratkaisee mahdollisia ristiriitatilanteita
- myöntää turvallisuustodistukset ja rautatiejärjestelmien käyttöönottoluvat
- ylläpitää junakalustorekisteriä
- hoitaa rautatiehenkilöstön kelpoisuus- ja koulutusasioita
- vastaa junien lipuntarkastuksista. (Mukula 2008)

VR on ainoa rautatieliikennettä kaupallisesti harjoittava rautatieyrittäjä Suomessa (Paavilainen et al. 2011). Kansallinen tavarajunaliikenne avautui kilpailulle Suomessa vuonna 2007 EU:n toisen rautatiepaketin vaatimusten mukaisesti (Mukula 2008). Pitkäsen mukaan matkustajajunaliikenteen kilpailu saattaa avautua heti vuoden 2019 jälkeen, jolloin VR:n ja LVM:n tekemän sopimuksen mukainen VR:n yksinoikeus matkustajajunaliikenteen harjoittamiseen loppuu.

Matkustajajunaliikenteen tilaajat ovat pääkaupunkiseudun lähiliikenteen VR:ltä tilaava HSL ja liikenteen kannattamattomille reiteille tilaava LVM. Lehmuskosken mukaan VR vastaa aikataulusuunnittelusta, jota varten HSL esittää junamäärä-, vuoroväli- ja liikennöintiäikatoivomuksensa.

Pääkaupunkiseudun Junakalusto Oy hankkii, omistaa ja hallinnoi lähiliikenteen kalustoa. Radanpidon suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitoyrityksistä merkittävien on VR-konserniin kuuluva VR Track Oy.

5.2 Palvelutaso käsitteenä

LVM:n (2006) mukaan joukkoliikennemuodon kokonaispalvelutaso on laaja käsite, jonka selkeä määrittäminen on haastavaa. Se voidaan jakaa esimerkiksi vuoro-, kulkuneuvo-, terminaali-, ja väyläpalvelutasoon.

Palvelutasoluokan muodostamat osa- eli palvelutasotekijät määrittävät liikenteen palvelukyvyyn tietyssä kuljetustehtävässä. Ne voidaan jakaa esimerkiksi liikenteellisiin tai matka-ajan tekijöihin (Pesonen ja Moilanen 2006). Tässä työssä käsitellään rautatieliikenteen aikataulun palvelutasoa, jonka tarkka määrittäminen edellyttää työssä kehitettävän aikataulujen arviointikehikon käyttämistä. Palvelutasotekijöiksi luetaan kaikki aikataulusta mitattavat tai määritettävät liikennetekniset tekijät.

Tavoitepalvelutaso syntyy osapuolten näkemysten yhteensovittamisen tuloksena. Osapuolet voidaan jakaa organisoijiin, palveluntarjoajiin ja matkustajiin. Tavoitepalvelutaso ja sen tärkeimmät palvelutasotekijät määritetään yleensä matkustajan näkökulmaa painottaen. Palvelutasotekijät koetaan subjektiivisesti ja osa niistä on vaikea määrittää. Palvelutasotekijöiden painoarvo palvelutasossa riippuu näkökulmasta. (Pesonen ja Moilanen 2006)

Palvelutason määrittämisen tehtävät ovat

- joukkoliikenteen palveluvaatimusten asettaminen käyttäjätarpeiden ja liikennepoliittisten tavoitteiden lähtökohdista
- yhteistyömuotojen kehittäminen osapuolten kesken
- yhteistoiminnan jatkuvuuden turvaaminen
- osapuolten sitouttaminen palvelutason toteuttamiseen. (Liikennevirasto 2010d)

Palvelutason määrittämisessä osapuolten on huomioitava etenkin seuraavat tekijät:

- liikennepoliittiset tavoitteet
- ilmasto- ja energiapoliittiset tavoitteet
- joukkoliikenteen kulkutapajakaumatavoitteet
- kansalaisten ja elinkeinoelämän tarpeet
- joukkoliikenteen rahoitusmahdollisuudet. (Liikennevirasto 2010d)

5.3 Osapuolten palvelutasotavoitteet ja aikataulusuunnittelun prioriteetit

5.3.1 Rautatieliikenteen yleiset palvelutasotavoitteet

Rautatieliikenteellä on monia palvelualueita, joiden kesken sen rooli voi vaihdella. Tämä vaikuttaa liikenteen palvelutasotavoitteeseen. (Liikennevirasto 2010d.) Yleisesti ottaen tärkeimpiä tavoitteita ovat liikenteen täsmällisyys ja turvallisuus, kustannustehokkuus ja ratakapasiteetin tehokas hyödyntäminen (UIC 2007).

Kerosuon (2002) mukaan matkustajille tärkeimmät palvelutasotavoitteet ovat täsmällisyys, matka-aika, vuoroväli ja junatarjonta. Rautatieyritykselle on tärkeää, että

suuri osa sen omasta kalustosta liikennöi tehokkaalla kalustokierrolla. Lähiliikenteelle tärkeitä tavoitteita ovat liikenteen täsmällisyys ja junatiheys, kaukoliikenteelle puolestaan liikenteen täsmällisyys, matka-aika ja matkustusmukavuus.

Radanpitäjän ja rautatieyrityksen onnistumista tehtävissään voidaan arvioida liikenteen täsmällisyyden perusteella (Salkonen ja Mäkelä 2010, Paavilainen et al. 2011), jolla on selkeä vaikutus asiakastyytyväisyyteen ja matkustajamääriin (Salkonen 2008): täsmällisyys on matka-aikaakin tärkeämpi tekijä matkustajan näkökulmasta (Goverde 1998). Sen merkitys on kasvanut jatkuvasti tavarajunaliikenteessä, jossa kuljetuskustannus on pitkään ollut palvelutason tärkein kriteeri (Iikkanen ja Siren 2005).

5.3.2 Liikennevirasto – radanpitäjä

Liikenneviraston julkaisuissa Rautatieliikenne 2030 (RHK 2006) ja Tulevaisuuden henkilöliikenneselvitys (RHK 2009) mainitaan kaukojunaliikenteen palvelutasotavoitteiksi riittävän tiheät, täsmälliset ja nopeat junayhteydet. Lisäksi häiriöiden on oltava runkorataverkolla harvinaisia ja syntymisensä jälkeen hyvin hallittavissa. Tärkeinä pidetään myös ihanteellisia yhteysajoituksia odotus- ja vaihtoaikojen minimoimiseksi sekä ratakapasiteetin tehokasta käyttöä. Matkustajien kannalta tärkeitä asioita ovat myös aikataulujen helppokäyttöisyys ja yhteyksien selkeys (Liikennevirasto 2010d). Tavarajunaliikenteen tärkeimmät palvelutasotavoitteet ovat kustannustehokkuus ja täsmällisyys sekä junien ajoaikojen lyhentäminen, jos se ei estä edeltävien tavoitteiden toteutumista (RHK 2006).

Liikenneviraston rataliikennekeskuksella on valtuus tehdä päätöksiä ja toimenpiteitä, kun aikataulu ei toteudu suunnitelman mukaisesti. Helanderin mukaan valintatilanteet liittyvät junien välisen priorisoinnin lisäksi ratatyön ja junan kulun priorisointiin, jolloin pitää ajatella kokonaisuutta: jos ratatyöt joutuvat odottamaan junaa, tarkoittaa se usein suurten resurssien hukkaanmenoa. Toisaalta, esimerkiksi ruuhka-aikana matkustajille tulisi taata sujuva liikkuminen.

Helanderin mukaan viiveiden ketjuuntumisella on suuri merkitys junien väliseen priorisointiin: päätökset tehdään tilannekohtaisesti kokonaisuutta katsoen, huomioiden muun muassa matkustajamäärät, kalustokierron, vaihtoyhteydet, junakohtaukset ja -ohitukset sekä junien kääntymiset, eikä systemaattisesti junien etusijajärjestystä noudattaen. Yksiraiteisilla rataosilla, joissa ratakapasiteetin käyttöaste on korkea eikä pelivaraa ole tarpeeksi viiveistä palautumiseen, on järkevää perua yksittäinen junavuoro tai antaa ainoastaan tietyn yksittäisen junan kokea viive.

Kuvassa 58 on esitetty tiivistetysti Liikenneviraston rataliikennekeskuksen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit. Liikenneviraston julkaisuissa (RHK 2006, RHK 2009) mainituista tärkeimmistä palvelutasotavoitteista ratakapasiteetin tehokas käyttö ja riittävän tiheät junayhteydet eivät ole listalla, koska Helanderin mukaan aikataulut ovat nykyiselläänkin tiukkoja. Junatarjontaa onkin päätetty vähentää, mikä heikentää matkustajien palvelutasoa. Suomessa tarjonnan vähentäminen nähdäänkin viimeisenä keinona häiriösietoisuuden parantamiseksi, vaikka se lisää liikenteen täsmällisyyttä (Liikennevirasto 2010c).



Kuva 58. Liikenneviraston rataliikennekeskuksen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.

5.3.3 VR – rautatieyrittäjä; matkustajajunaliikenne

HäiriösiETOISUUS on VR:lle aikataulun tärkein palvelutasotekijä, koska matkustajat edellyttävät liikenteeltä ennen kaikkea täsmällisyyttä säästä riippumatta. Matkustajille on myös tärkeää saada etukäetietoa junien viiveiden vaikutuksista matkaketjuihinsa, mikä myös lisää merkittävästi epätasallisuuden ja liikennepoikkeuksien hyväksymistä.

Matkustajat toivovat lyhyitä matka-aikoja, ja kysynnän pitää määritellä tarjontaa. Matka-aika on VR:n matkustajajunaliikenteen vahvin kilpailuetu. Oksasen mukaan lyhyeen matka-aikaan päästään vähentämällä junien pysähdyksiä. Jos se ei ole palvelutasovaatimuksen takia mahdollista, vähän pysähdyksiä sisältäviä junavuoroja täytyy lisätä. Sitä saattaa rajoittaa ratakapasiteetin puute ja kalliimmat operointikustannukset.

Lyhyt matka-aika on VR:lle tärkeämpää kauko- kuin lähijunaliikenteessä. Hovin mukaan kaukojunamatkojen nopeuttaminen onkin näkynyt matkustajamäärissä jopa joustokertoimella -1, eli matka-ajan lyheneminen lisää matkustajamääriä prosentuaalisesti saman verran.

Mannerströmin mukaan junien lisäämismahdollisuuden tärkeys korostuu, kun liikenteessä on tuntikohtaista vaihtelua tai kasvua korkeintaan keskipitkällä aikavälillä. VR:lle varsinkin lähijunaliikenteessä tiheä vuoroväli on tärkeää, koska rautatieliikenne kilpailee henkilöautoliikenteen kanssa; junia lisätään kysynnän mukaan esimerkiksi ruuhkatunneille. Oksasen mukaan kaukojunaliikenteessä aikataulurakenteen muuttaminen muutaman lisäjunavuoron takia saattaa olla työlästä tai vaatia muutoksia raitinfraktruktuuriin.

Pekosen mukaan vakioaikataulurakenne helpottaa VR:n liikenteen operointia, koska rakenteen toistuvuuden takia se voidaan muistaa ulkoa ja häiriöt ovat helpommin ennakoitavissa. Hovin mukaan se sopii hyvin lähi- ja kaukojunaliikenteen sekarakenteille ja on erityisen tärkeä korkean liikennesuorituksen rataosilla. VR ei suunnittele

vakioaikataulurakennetta tarkoituksenhakuisesti rataosille, joissa sille ei ole liikennesuoritteen ja matkustajamäärien perusteella tarvetta. Tämä tuo joustoa esimerkiksi tavarajunien aikatauluviivojen suunnittelemiseen.

Hovin mukaan vakioaikataulussa kannattaa VR:n näkökulmasta usein ajaa sen rakenteeseen sopivia liiketaloudellisesti kannattamattomia junia, jos on ylimääräistä kalustoa ja resursseja. Tällöin junan ajamisen kustannus suhteessa kalustokustannuksiin on pieni, mutta matkustajat käyttävät järjestelmää halukkaammin sen tarjonnan kasvaessa ja voidessaan luottaa vuorovälin säännöllisyyteen. Jos vakioaikatauluviiva jää joskus käyttämättä, vapautuva ratakapasiteetti voidaan hyödyntää esimerkiksi tavarajunille. Myöhemmässä vaiheessa viiva voidaan tarvittaessa ottaa käyttöön.

Oksasen mukaan aikataulu, jossa on eripituisia junalinjoja ja pysähtymistiheys lyhyillä linjoilla pitkiä linjoja suurempi, sopii hyvin Suomeen: Helsingistä etäännyttäessä liikennepaikkavälien matkustajamäärät laskevat jyrkästi. VR:lle tällainen aikataulu tuo säästöjä kalusto- ja henkilöstökustannuksiin vähentyneen kalustotarpeen ja lyhentyneiden henkilöstötyövuorojen takia. VR on myös tehostanut kalustokierron suunnittelua uuden kaluston lisääntymisen myötä, koska junia ole varaa seisottaa varikoilla.

Vaihtoyhteyksiltä edellytetään luotettavuutta, koska ei ole mahdollista tarjota paljon suoria linjoja: kysyntä ei kohtaisi tarjontaa tasaisesti, kapasiteetin kuormittuessa väärin rataverkolla ja matkustajavaunuissa. Myöskään taloudellisia resursseja ei ole tarpeeksi junatarjonnan lisäämiseksi. Toimivilla vaihtoyhteyksillä VR saa palveltua pieniäkin matkustajavirtoja kohtalaisesti.

Vaihtoajat on asetettu lähes käytännön minimiin. Lähijunaliikenteessä niitä ei ole suunniteltu matkaketjujen ehdoilla, koska radat ovat tiheästi liikennöityjä. Kaukojunaliikenteessä vaihtoyhteydet on puolestaan suunniteltu usein tietyn tärkeän junan kannalta, eli yhdellä solmuaseman vaihtoyhteyksijunalla palvellaan jopa monia saapuvia junia. Hovin mukaan ennen vakioaikataulurakenteen olemassaoloa matkaketjut eivät yleensä olleet erityisen toimivia, koska vaihtoyhteyksien suunnittelu ei ollut kokonaisvaltaista.

VR:n aikataulusuunnittelua vaikeuttaa muutama perustavanlaatuinen ongelma: ratakapasiteettia ja kaksiraiteisia rataosia ei ole tarpeeksi, eikä liikennettä voida jakaa tasaisesti pitkin vuorokautta matkustajien tarpeiden takia. Nykyiselle ratainfrastruktuurille ja -kapasiteetille liian suuri liikennesuorite on lisännyt aikataulujen häiriöherkkyyttä selkeästi. Matkustajajunaliikennettä on päätetty vähentää, jotta liikenteen täsmällisyys paranisi ilman matka-aikojen liiallista kasvua ja tavarajunille varatun ratakapasiteetin vähenemistä.

Ratatyöt vaikeuttavat osaltaan aikataulusuunnittelua: niiden takia rataverkolla on paljon poikkeusjärjestelyjä kesäkaudella. Hovin mukaan suunnittelun helpottamiseksi niistä olisi saatava nykyistä aikaisemmin tietoa Liikennevirastolta.

Kuvassa 59 on esitetty tiivistetysti VR:n matkustajajunaliikenteen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.



Kuva 59. VR:n matkustajajunaliikenteen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.

5.3.4 VR – rautatieyrittäjä; tavarajunaliikenne

Kososen mukaan tavarajunaliikenteen aikatauluviivojen pitää sopia suoraan asiakkaiden toivomuksiin ja tuotantoprosesseihin. Mitä enemmän VR saa tuotannolleen hyödyllisiä ominaisuuksia aikatauluun, sitä parempi. Ikkasen mukaan ratakapasiteetin korkean käyttöasteen, liikenteen homogeenisuuden säilyttämisen ja junien etusijajärjestyksen takia tavarajunia joudutaan usein kuitenkin liikennöimään aikoina, jotka eivät ole optimaalisia teollisuudelle ja kaupan jakelulle.

VR:n tavarajunaliikenteelle kuljetuskustannus on tärkein palvelutasotavoite, joten aikataulun pitää mahdollistaa tehokas kalustokierto. Suorien tavarajunalinjojen lisääminen tehostaa kalustokiertoa, muttei aina ole mahdollisia: aikataulusuunnittelussa pitää huomioida koko kuljetusreitti. Monilla tavarajunilla on vuorokausikierto, minkä takia niiden aikatauluviivat pitää suunnitella tarkasti tiettyihin liikennöinti-aikoihin. Lähtökohtaisesti tavarajunien keskinopeudet saavat olla matalia, ellei ajoajan lyhentäminen tuo säästöjä kalustokiertoon tai vaikuta tarvittavan kaluston määrään.

Teollisuusyritysten toimintaprosessit on rakennettu tavalla, joka nykyään edellyttää tavarakuljetuksiltakin usein täsmällisyyttä. Se on kriittinen tekijä, kun junakaluston pitää suorittaa tiukalla aikataululla uusi kuljetus edellisen perään tai kuljetus jatkuu aikataulutetusti toisella kuljetustavalla (esimerkiksi raakapuun kuljetukset).

Suomessa tavarajunaliikenne on perinteisesti saanut kulkea reilusti etuajassa, mikä perustuu tavarajunien aikaisempaan liikkeellelähtövalmiuteen. Kehityssuuntana on kuitenkin ollut vähentää etuajassa ajamista. (Mäkitalo 2001.) Toisaalta, tavarajunien mahdollisuus ajaa etuajassa tuo VR:lle joustavuutta esimerkiksi kalustokierron suunnitteluun (Nervola 2009).

Aikataulun häiriösiETOisuus on täsmällisyysvaatimuksen takia tärkeä palvelutasotekijä VR:lle. Ennakkotieto junien myöhästymisistä on tärkeää resurssien mitoitukselle ja järjestelylle: viiveellä voi olla vaikutus teollisuuden prosesseihin ja esimerkiksi viennin

jatkokuljetuksiin. Kososen mukaan rautatieyrityksellä pitää aina olla mahdollisuus korjata häiriö, esimerkiksi ohjaamalla pahasti myöhässä oleva juna toiselle raiteelle. Tämän takia aikataulussa on hyvä olla käyttämätöntä kapasiteettia järkevissä paikoissa, jotta kohtuullisista viiveistä voidaan palautua suhteellisen nopeasti.

Kososen mukaan liikenteen homogeenisuuden merkitys VR:lle riippuu rataosasta: jos ratakapasiteettia on tarpeeksi jäljellä, ei homogeenisuudella ole erityistä merkitystä tavarakuljetuksille. Junien nopeuserojen kasvaessa kapasiteettia menee hukkaan, joten ellei ratainfrastruktuuria kehitetä esimerkiksi rakentamalla lisää kaksiraiteisia rataosia matkustajajunien nopeuksia nostettaessa, VR:lle syntyy paineita nopeuttaa tavarajunia. Mikäli niin ei tehdä, vaan rakennetaan kohtaus- ja ohituspaikkoja, seurauksena tavarajunien ajoajat kasvavat. Matkustajajunien nopeuksien laskeminen voi joissain tapauksissa olla kokonaisuuden kannalta järkevää, mutta sitä ei voida suositella lähtökohtaiseksi ratkaisuksi ongelmiin.

Kososen mukaan uusien rautatieyritysten tullessa markkinoille junien lisäämismahdollisuuden merkitys tavarajunaliikenteessä kasvaa. Se on tärkeää myös siksi, että yritysten kuljetustarpeet vaihtelevat ja vakiotavarajunaliikenne suunnitellaan vain 6 viikkoa ennen kuljetusta. Oksasen mukaan VR:n suunnittelijat eivät pysty ennakoimaan riittävän hyvin, mitä asiakkaat haluavat ja jättävät enemmän aikatauluviivoja ratakapasiteettihakemukseen kuin mitä vakiotavarajunat tarvitsevat. Tämä mahdollistaa kapasiteetin saatavuuden, kun sen kysyntä lisääntyy.

Tavarajunaliikennettä haittaavat osittain myös Liikenneministeriön ostoliikennettä olevat kiskobussilinjat, jotka VR:n on ajettava tietyin reunaehdoin. Kososen mukaan LVM ylläpitää tiettyä tarjontaa esimerkiksi aluepoliittisten syiden takia, vaikka linjoilla on matkustajajunaliikenteelle kokonaisuudessaan vähäinen merkitys – toisin kuin tavarajunaliikenteelle. Nykyinen tilanne ei ole rautatieliikenteelle tasapainoinen.

Jos VR on jatkossakin ainoa rautatieyritys, Kososen mukaan junien kulku olisi tavaraliikenteen kilpailukyvyn parantamiseksi hyvä pystyä suunnittelemaan joustavasti lähekkäin olevien lastaus- ja purkupaikkojen välillä: järkevin kulkujärjestys vaihtelee asiakastarpeiden ja kuljetettavan rahdin perusteella. Tällä palveltaisiin kaluston ja henkilöstön kiertoa ja käyttöä. Iikkasen mukaan ongelmallista koko kuljetusketjulle on tosin se, että VR harventaa lastaus- ja purkupaikkaverkkoa ja ajaa suuria junayksiköitä, jonka seurauksena kuorma-autojen kuljetusmatkat pitenevät ja kustannukset nousevat.

Kuvassa 60 on esitetty tiivistetysti VR:n tavarajunaliikenteen aikataulusuunnittelun tärkeimmät prioriteetit..



Kuva 60. VR:n tavarajunaliikenteen tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.

5.3.5 HSL – matkustajajunaliikenteen tilaaja

HSL:lle liikenteen täsmällisyys on jopa tärkeämpi palvelutasotavoite kuin matka-aika, vuoroväli ja matkan kustannus. Täsmällisyystavoitteesta jääminen on merkittävin ongelma lähijunaliikenteessä. Rautatieliikenne on runko, jonka varaan koko joukkoliikennejärjestelmä rakennetaan. Muut joukkoliikennemuodot – etenkin metro – ovat rautatieliikennettä täsmällisempiä. Järjestelmässä, jossa lyhyempien vuorovälien runkoliikenteestä tullaan pidempien vuorovälien liityntäliikenteeseen (rautatieliikenteestä linja-autoliikenteeseen), pitää runkoliikenteen olla luotettava. Jos luotettavuus ei ole riittävä, vaaditaan vuoroväliltään tiheämpi liityntälinjasto. Tämä tarkoittaa kahta keskitasoista järjestelmää yhden hyvätasoisien sijaan ja suurempia kustannuksia. VR:ltä odotetaan nopeasti merkittäviä toimenpiteitä lähijunaliikenteen tilanteen parantamiseksi, koska kuluu jopa kymmenen vuotta ennen niiden vaikutusten näkymistä.

Hyötyjen arvottamista tavana- ja matkustajajunaliikenteen välillä ei aina tehdä HSL:n näkökulmasta loogisesti. Lisäksi, saatetaan niiden matkustajajunien antaa odottaa, joissa on moninkertainen määrä matkustajia priorisoitaviin juniin verrattuna. Kaupunkiradoilla liikenne sujuu paremmin kuin sekaradoilla, joissa lähijunien pitää odottaa nopeita kaukojunia. Keskittyminen kaupunkiratojen tehokkaampaan hyödyntämiseen olisi siksi järkevää.

Kilpailun avautumisen myötä VR:lle syntyy paineita asioiden muuttamiseksi, mutta jo nyt pitäisi tehdä toimenpiteitä. VR:n on toki itsensä kannalta järkevää priorisoida niitä, joilta se saa suoria tuloja. Yhteiskunta kuitenkin omistaa sekä VR:n että HSL:n, eikä sen hyötyjen kannalta nykyinen tilanne ole optimaalinen.

Lähijunaliikenteen minimijunaväli (5 minuuttia) on HSL:n mielestä liian suuri. Keski-Euroopassa on ratoja, joilla liikennöidään junia perinteisellä kulunvalvontatekniikalla 3 minuutin vuorovälillä. Vuorovälin lyhentäminen on HSL:lle tärkeä tavoite myös lähiliikenteessä. Nykyisen kulunvalvontatekniikan aikana se kuitenkin edellyttää

lyhyempiä opastinvälejä. HSL onkin tiedustellut Liikennevirastolta mahdollisuutta tähän. Liikennevirasto on rakentanut raiteet ja opastimet niin, että pisin mahdollinen tavarajuna voi ajaa lähiliikenne- ja jopa kaupunkiradoilla.

Koska tavarajunat ovat hyvinkin pitkiä, on opastinväli pitkä myös lähijunaliikenteen radoilla. HSL:n näkökulmasta ei ole missään määrin tarkoituksenmukaista, että lähiliikenteen kymmenien miljoonien vuosittaisten matkustajien vuoroväli on pitkä tai liikenteen palautumiskyky häiriöistä heikko sen takia, että vain muutaman kerran vuodessa kaupunkiradoilla liikennöi tavara- tai kaukojuna. Yhteiskuntataloudelliset hyödyt olisivat merkittävät, jos opastinväliä voitaisiin lyhentää ja siten mahdollistaa pienempi minimijunaväli. Se palvelisi HSL:n kahta tärkeintä palvelutasotavoitetta eli liikenteen täsmällisyyttä ja matkustajan matka-aikaa.

Liikenteen hahmotettavuuden kannalta vakioaikataulu on paras aikataulurakenne runkoliikenteessä. HSL on asteittain siirtymässä vakioaikataulurakenteeseen myös linja-autoliikenteessä. Vaihtoyhteyksien täytyy toimia hyvin, ja HSL on tutkinut niitä eri matkavastuksia sisältävällä liikennemallilla. Junien pysähdykset asemilla suunnitellaan palvelemaan kokonaisuutta mahdollisimman hyvin. Ne riippuvat asemien matkustajamääristä.

Kuvassa 61 on esitetty tiivistetysti HSL:n tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.



Kuva 61. HSL:n tärkeimmät aikataulusuunnittelun prioriteetit.

5.3.6 Yhteenvedo ja kriteerien valinta

Haastatteluissa tärkeimmiksi matkustajajunaliikenteen prioriteeteiksi nousivat aikataulun häiriösiETOISUUS, junan ajoaika, vakioaikataulurakenne ja vaihtoyhteydet. Tavarajunaliikenteelle tärkeimmät prioriteetit olivat häiriösiETOISUUS, kalustokierto, junien lisäämismahdollisuus ja vakioaikataulurakenne.

Kriteereiksi valittiin häiriösiETOISUUS, junan ajoaika, vakioaikataulurakenne, vuoroväli ja junien lisäämismahdollisuus. Kirjallisuusselvityksen perusteella vaihtoyhteydet jätettiin

pois, koska se ei ole varsinainen tekninen palvelutasotekijä, sen tarkastelu ei ole yksiselitteistä ja edellyttää joidenkin sellaisten asioiden (esimerkiksi matkaketjut) tietämistä, joita aikataulusta ei suoraan nähdä. Vuoroväli puolestaan valittiin kriteeriksi, koska se on erityisen tärkeä HSL:lle. Neljä muuden kriteerin valinta oli perusteltua niiden osakseensa saamien mainintojen määrällä.

6 ARVIOINTIKEHIKKO JA ANALYYTTINEN HIERARKIAPROSESSI

6.1 Parivertailujen tulokset

Taulukosta 6 nähdään, että häiriösietoisuus osoittautui selkeästi tärkeimmäksi kriteeriksi, mikä oli odotettavissa asiantuntijahaastattelujen perusteella. Vaikka vastausten johdonmukaisuusvaatimus ($CR < 0,10$) ei täytynyt, häiriösietoisuuden (0,39) merkitys lähtökohtaisesti tärkeimpänä kriteerinä vaikuttaa kiistattomalta. HSL:lle tosin junan ajoaika (0,35) ja junien lisäämismahdollisuus (0,28) ovat häiriösietoisuuttakin (0,23) tärkeämpiä kriteereitä. Muiden palvelutasotekijöiden painoarvojen hajonta on suhteellisesti varsin suuri, mutta painoarvojen keskiarvojen vaihteluväli pieni (0,14–0,16). Niiden asettaminen tärkeysjärjestykseen ei ole järkevää, koska vastausten johdonmukaisuus ei ollut riittävän korkea.

Taulukko 6. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus, painoarvojen ja johdonmukaisuuden aritmeettiset keskiarvot ja keskihajonta

Kriteeri	Asiantuntija (TLK = tavaraliikenteen konsultti)								Ka.	σ
	LiVi	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	HSL	TLK		
Häiriösietoisuus	0.52	0.54	0.55	0.39	0.37	0.27	0.23	0.27	0.39	0.13
Junan ajoaika	0.03	0.08	0.04	0.23	0.22	0.05	0.35	0.27	0.16	0.12
Vakioaikataulurakenne	0.11	0.18	0.13	0.10	0.17	0.13	0.03	0.27	0.14	0.07
Vuoroväli	0.10	0.17	0.24	0.05	0.20	0.33	0.11	0.09	0.16	0.09
Junien lisäämismahdollisuus	0.25	0.03	0.04	0.23	0.04	0.23	0.28	0.09	0.15	0.11
CR	0.18	0.24	0.21	0.15	0.16	0.35	0.06	0.00	0.17	0.11

VR:ltä vastaajia oli 5, ja suurimmat näkemyserot vastaajien kesken koskivat junan ajoaikaa ja junien lisäämismahdollisuutta: molemmille kolme vastaajaa antoi hyvin pienen painoarvon, kahdelle vastaajalle niillä oli puolestaan suurin merkitys häiriösietoisuuden jälkeen. VR:n vastausten perusteella häiriösietoisuuden (painoarvo 0,42) jälkeen tärkein kriteeri on vuoroväli (0,20), muiden kolmen olleen lähellä toisiaan (vakioaikataulurakenne 0,14; junan ajoaika 0,12; junien lisäämismahdollisuus 0,11).

Liikenneviraston vastaajalle häiriösietoisuus (0,52) on ylivoimaisesti tärkein ja junien lisäämismahdollisuus (0,25) selkeästi toiseksi tärkein kriteeri. Vakioaikataulurakenne (0,11) ja vuoroväli (0,10) ovat kutakuinkin yhtä tärkeitä, junan ajoajan (0,03) painoarvon jäädessä hyvin pieneksi.

Tavaraliikenteen konsultti arvioi kriteerien välisiä tärkeyseroja hillitymmiin, minkä takia vastausten johdonmukaisuuskin oli poikkeuksellisen hyvä. Häiriösietoisuus, junan ajoaika ja vakioaikataulurakenne saavat samat painoarvot (0,27) samoin kuin vuoroväli ja junien lisäämismahdollisuus (0,09).

Parivertailujen tekeminen edellytti vastaajilta valitsemansa näkökulman ottamista aikataulusuunnitteluun, asioiden yleistämistä ja tietyn lähtökohtaisia yksinkertaistuksia. Vaikka kriteerit ja tehtävänanto määriteltiin selkeästi, kunkin vertailuparin välisen lähtökohtaisen tärkeyseron hahmottaminen oli hyvin subjektiivinen tehtävä. Nämä syyt luultavasti osittain vaikuttivat painoarvojen keskihajontaan.

Taulukosta 7 nähdään kriteerien ominaisarvot λ . Kunkin kriteerin λ :n ollessa 1,00 ja niiden yhteenlasketun ominaisarvon λ_{max} ollessa 5,00, ovat vastaukset täysin johdonmukaisia. Mitä enemmän λ poikkeaa arvosta 1,00, sitä enemmän se on keskimäärin yli- ($>1,00$) tai alipainottunut ($<1,00$) parivertailuissa.

Taulukko 7. Kriteerien ominaisarvot

λ	LiVi	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	HSL	TLK
$\lambda_{\text{Häiriösietoisuus}}$	0.87	0.88	0.87	0.89	0.88	1.46	1.25	1.00
$\lambda_{\text{Junan ajoaika}}$	0.95	1.38	0.92	1.19	1.20	0.78	0.98	1.00
$\lambda_{\text{Vakioaikataulurakenne}}$	1.20	1.54	1.93	1.22	1.22	0.97	0.94	1.00
$\lambda_{\text{Vuoroväli}}$	1.41	1.43	1.34	0.92	1.48	1.87	1.14	1.00
$\lambda_{\text{Junien lisäämismahdollisuus}}$	1.39	0.83	0.88	1.46	0.95	1.50	0.96	1.00
λ_{max}	5.82	6.06	5.94	5.67	5.73	6.58	5.27	5.00

Kun kriteerien painoarvoja peilataan niiden ominaisarvoihin, häiriösietoisuuden tärkeys korostuu: suurimmassa osasta vastauksista se alipainottui. Junan ajoaika ja junien lisäämismahdollisuus sekä yli- että alipainottuivat, mutta vakioaikataulurakenne ja etenkin vuoroväli ylipainottuivat suurimmalla osalla vastaajista.

Kriteerien painoarvojen ja ominaisarvojen tutkimisen perusteella junan ajoaikaa ja junien lisäämismahdollisuutta voisi pitää hieman vakioaikataulurakennetta ja vuoroväliä tärkeämpinä palvelutasotekijöinä, mikä ei kuitenkaan ole tieteellisesti perusteltua. Häiriösietoisuuden jättäminen pois parivertailuista on parempi tapa yrittää muodostaa tärkeysjärjestys, koska häiriösietoisuuden painoarvon poistuminen painottamisesta saattaa muuttaa vastausten johdonmukaisuutta ja tuoda paremmin esille muiden kriteerien tärkeyserot.

Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty samat asiat kuin taulukoissa 6 ja 7, mutta ilman häiriösietoisuuden mukanaoloa painottamisessa.

Taulukko 8. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus, painoarvojen ja johdonmukaisuuden aritmeettiset keskiarvot ja keskihajonta (häiriösietoisuus ei mukana painottamisessa)

Kriteeri	Asiantuntija (TLK = tavaraliikenteen konsultti)								Ka.	σ
	LiVi	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	HSL	TLK		
Junan ajoaika	0.04	0.12	0.07	0.41	0.39	0.09	0.39	0.38	0.23	0.17
Vakioaikataulurakenne	0.21	0.42	0.26	0.16	0.25	0.16	0.05	0.38	0.24	0.12
Vuoroväli	0.19	0.40	0.59	0.08	0.31	0.55	0.16	0.13	0.30	0.19
Junien lisäämismahdollisuus	0.57	0.06	0.08	0.35	0.05	0.21	0.39	0.13	0.23	0.19
CR	0.10	0.17	0.19	0.27	0.22	0.09	0.04	0.00	0.13	0.09

Häiriösietoisuuden poistaminen nosti vuorovälin hieman kolmea muuta kriteeriä tärkeämmäksi. Asiantuntijan VR3 vastausten johdonmukaisuus laski selkeästi (0,15:stä 0,27:een) ja VR4:n hieman (0,16:sta 0,22:een), kun taas asiantuntijan VR5 kohdalla johdonmukaisuus nousi 0,35:stä 0,09:ään. Muiden asiantuntijoiden vastausten johdonmukaisuuksissa tapahtui pientä parannusta; VR1:n johdonmukaisuus parani niistä eniten (0,24:stä 0,17:ään).

HSL:n vastauksissa junien lisäämismahdollisuus saa junan ajoajan kanssa saman painoarvon (0,39), vakioaikataulurakenteen ollessa edelleen painoarvoltaan selkeästi pienin (0,05). Vuorovälin (0,16) painoarvo on edelleen toiseksi pienin.

VR:n vastauksissa vuoroväli saa selkeästi korkeimman painoarvon (0,38). Vakioaikataulurakenne (0,25) on hieman junan ajoaika (0,21) tärkeämpi kriteeri, junien lisäämismahdollisuuden (0,15) ollessa painoarvoltaan pienin. Nähdään, että häiriösietoisuuden poistaminen painottamisesta lisäsi eroja muiden kriteerien välillä, muttei muuttanut tärkeysjärjestystä.

Liikennevirastolle kriteerien tärkeysjärjestys oli sama ja niiden suhteelliset erot kutakuinkin samat kuin häiriösietoisuuden ollessa mukana painotuksessa. Tavaraliikenteen konsultin vastaukset olivat alun perin täysin johdonmukaiset, joten muutosta kriteerien tärkeysjärjestykseen ei syntynyt.

Taulukko 9. Kriteerien ominaisarvot (häiriösietoisuus ei mukana painottamisessa)

Kriteeri	Asiantuntija							
	LiVi	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	HSL	TLK
$\lambda_{\text{Junan ajoaika}}$	0.94	1.56	0.98	0.88	0.98	0.96	0.97	1.00
$\lambda_{\text{Vakioaikataulurakenne}}$	1.07	0.99	1.70	1.35	1.31	1.04	0.97	1.00
$\lambda_{\text{Vuoroväli}}$	1.34	0.95	0.90	0.97	1.39	0.96	1.18	1.00
$\lambda_{\text{Junien lisäämismahdollisuus}}$	0.93	0.95	0.95	1.54	0.91	1.28	0.97	1.00
λ_{max}	4.27	4.45	4.52	4.74	4.59	4.24	4.10	4.00

Kun kriteerien painoarvoja peilataan niiden ominaisarvoihin, junan ajoaika painottui lähes oikein: vain yhdellä vastaajista se ylipainottui selkeästi. Vuorovälin ja junien lisäämismahdollisuuden kohdalla oli sekä yli- että alipainottumista (ylipainottuminen voimakkaampaa), mutta vakioaikataulurakenne ylipainottui suurimmalla osalla vastaajista.

Häiriösietoisuuden poistaminen painottamisesta muutti kriteerien painoarvoja ja vastausten johdonmukaisuuksia. Vuoroväli vaikuttaa hieman muita tärkeämmältä kriteeriltä, mutta kun huomioi tulosten ristiriitaisuuden häiriösietoisuus mukana tehdyn painotuksen kanssa, on syytä olla asettamatta kriteereitä tärkeysjärjestykseen. VR:n sisäisen tärkeysjärjestyksen luominen on perustellumpaa: kriteerien painoarvojen välillä on suurempia eroja kuin kaikkia vastauksia yhdessä tarkastellen, eikä niiden välinen järjestys muutu häiriösietoisuuden poistuessa painottamisesta.

Jos VR:n vastauksista otetaan keskiarvo ja lasketaan Suomen rautatieliikenteen kolmen pääosapuolen eli Liikenneviraston, VR:n ja HSL:n painoarvojen keskiarvot, saadaan taulukon 10 mukaiset tulokset.

Taulukko 10. AHP:n mukaisen parivertailun kriteerien painoarvot ja vastausten johdonmukaisuus Suomen rautatieliikenteen pääosapuolittain

Suomen Rautatieliikenteen pääasapuoittam								
	Osapuoli							
	LiVi		VR		HSL			
	Kriteerien määrä							
Kriteeri	5	4	5	4	5	4	Ka. 5	Ka. 4
Häiriösietoisuus	0.52		0.42		0.23		0.39	
Junan ajoaika	0.03	0.04	0.12	0.21	0.35	0.39	0.17	0.22
Vakioaikataulurakenne	0.11	0.21	0.14	0.25	0.03	0.05	0.09	0.17
Vuoroväli	0.10	0.19	0.20	0.38	0.11	0.16	0.14	0.25
Junien lisäämismahdollisuus	0.25	0.57	0.11	0.15	0.28	0.39	0.21	0.37
CR	0.18	0.10	0.22	0.19	0.06	0.04	0.15	0.11

Kun vastauksia tarkastellaan osapuolittain, VR:n asiantuntijoiden vastausten ollessa keskenään saman painoisia, kriteerien lopullisten painoarvojen kesken on enemmän eroa kuin otettaessa keskiarvo kaikista vastauksista. Kun kriteereitä vähennetään, vuoroväli nousee junan ajoaikaa tärkeämmäksi kriteeriksi; muiden kriteerien järjestys ei muutu. Junan ajoajan painoarvo nousee suhteellisesti selkeästi vähiten, muiden kriteerien painoarvojen noustessa kutakuinkin samassa suhteessa. Toisaalta, VR:n vastauksissa vakioaikataulurakenne ja vuoroväli selkeästi ylipainottuivat, kun kriteereitä oli 5. Kun kriteereitä oli 4, ylipainottui suhteellisen selkeästi ainoastaan vakioaikataulurakenne. Näillä ei ole kuitenkaan merkitystä kriteerien tärkeysjärjestykseen, oli kriteereitä painotuksessa mukana 4 tai 5.

6.2 Yhteenveto

Häiriösietoisuus osoittautui parivertailuissa selkeästi tärkeimmäksi kriteeriksi (painoarvo 0,39) olkoonkin, ettei vastausten johdonmukaisuusvaatimus täyttynyt. HSL:lle junan ajoaika (0,35) ja junien lisäämismahdollisuus (0,28) olivat häiriösietoisuuttakin (0,23) tärkeämpiä kriteereitä. Muiden kriteerien painoarvojen keskihajonta vastauksissa oli suhteellisesti varsin suuri, mutta niiden keskiarvot hyvin lähellä toisiaan (0,14–0,16).

Kriteerien painoarvojen ja niiden (vastausten johdonmukaisuuteen liittyvien) ominaisarvojen tutkimisen perusteella junan ajoaika ja junien lisäämismahdollisuus ovat vain hieman vakioaikataulurakennetta ja vuoroväliä tärkeämpiä palvelutasotekijöitä.

Tarkasteltaessa vastauksia osapuolittain, kriteerien lopullisten painoarvojen kesken oli enemmän eroa kuin otettaessa keskiarvo kaikista vastauksista: junan ajoaika muodostui häiriösietoisuuden jälkeen tärkeimmäksi kriteeriksi ennen vuoroväliä, junien lisäämismahdollisuutta ja vakioaikataulurakennetta.

Painottaminen ilman häiriösietoisuutta muutti kriteerien painoarvoja ja vastausten johdonmukaisuuksia: vuoroväli osoittautui tärkeimmäksi kriteeriksi. Tarkasteltaessa vastauksia osapuolittain ilman häiriösietoisuutta, vuoroväli nousi junan ajoaikaa tärkeämmäksi kriteeriksi; muiden kriteerien järjestys ei muuttunut.

7 TAPAUSTUTKIMUS

7.1 Tulokset

7.1.1 Kullasvaara–Luumäki

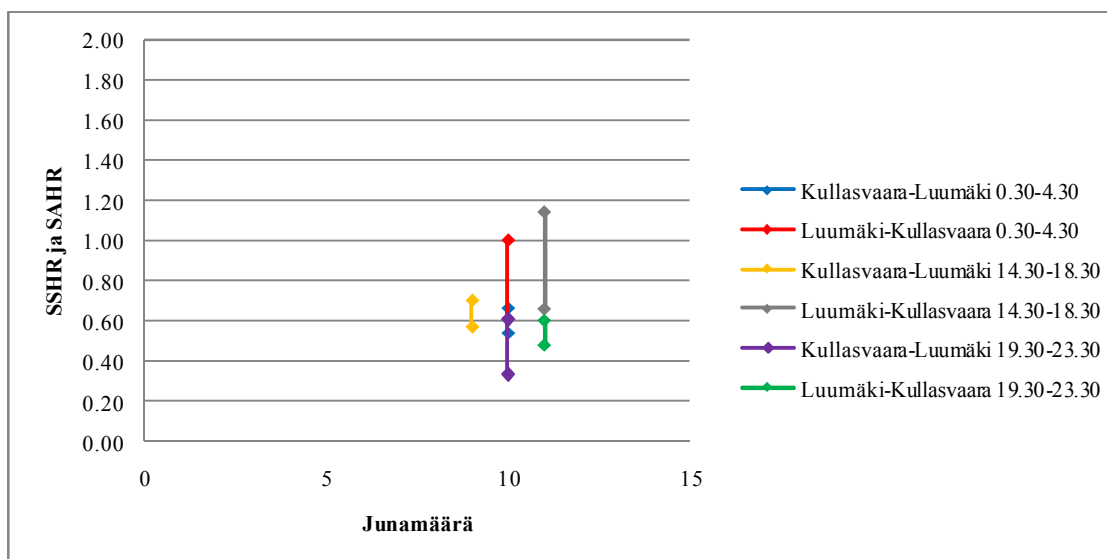
Lasketut mittarit ja junamäärät on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Luumäki–Kullasvaara-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liitteet D1–3)

Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
Kullasvaara-Luumäki 0.30-4.30	0.66	0.54	0.13	0.19	8	2	
Luumäki-Kullasvaara 0.30-4.30	1.01	0.61	0.40	0.40	9	1	
Kullasvaara-Luumäki 14.30-18.30	0.71	0.57	0.13	0.19	8		1
Luumäki-Kullasvaara 14.30-18.30	1.14	0.66	0.48	0.42	8	2	1
Kullasvaara-Luumäki 19.30-23.30	0.61	0.33	0.27	0.45	8	2	
Luumäki-Kullasvaara 19.30-23.30	0.60	0.48	0.12	0.20	9	1	1

Kullasvaara–Luumäki-suunnan aikaväleistä 19.30–23.30 saa pienimmät *SSHR*- ja *SAHR*-arvot huolimatta sen muita aikavälejä suuremmista junien nopeuseroista, koska sekä sen lähtö- että saapumisaikavälit ovat tasaisempia eivätkä junien nopeuserot ole kriittisissä kohdissa. Aikavälillä 14.30–18.30 on juna vähemmän kuin muilla aikaväleillä, mutta sen suurimmat nopeuserot ovat kriittisemmissä kohdissa.

Luumäki–Kullasvaara-suunnan aikaväleistä 19.30–23.30 saa pienimmät *SSHR*- ja *SAHR*-arvot, vaikka sillä on juna enemmän kuin muilla aikaväleillä. Tämä johtuu sen tasaisemmista junaväleistä ja pienemmistä junien nopeuseroista. Aikavälillä 14.30–18.30 on aavistuksen tasaisemmat junavälit kuin aikavälillä 0.30-4.30, mutta sillä oleva junaohitus nostaa mittarien arvoja. Kuvassa 62 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä.



Kuva 62. Luumäki–Kullasvaara-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.

Mittarien arvojen ja junamäärän välillä ei ole juurikaan riippuvuutta: koska junamäärä on pieni, se ei pakota junien lisäämiseen lähekkäin. Erot junaväleissä ja junien nopeuksissa ovat syyt arvojen hajontaan.

7.1.2 Lahti–Kouvola

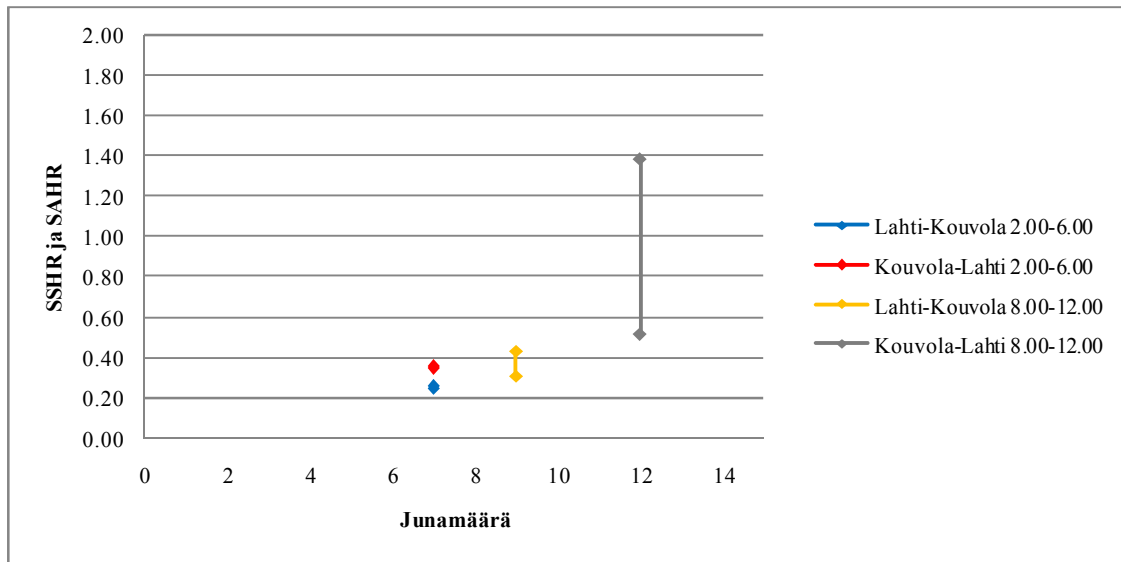
Lasketut mittarit ja junamäärät on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Lahti-Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D4-5)

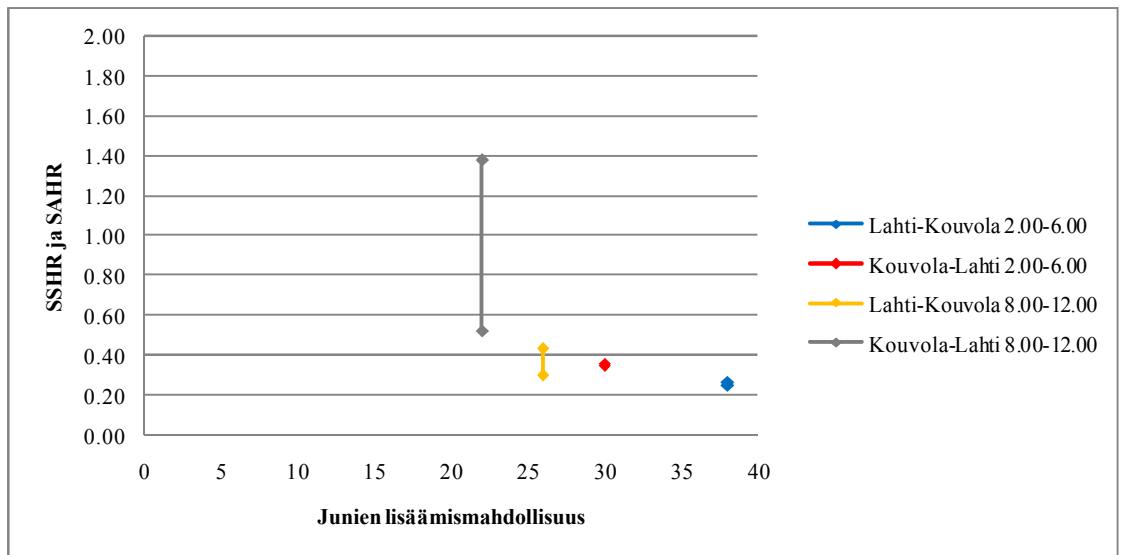
Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Lahti-Kouvola 2.00-6.00	0.26	0.24	0.01	0.05	6 + 1	38	0.16
Kouvola-Lahti 2.00-6.00	0.35	0.34	0.01	0.03	7	30	0.19
Lahti-Kouvola 8.00-12.00	0.43	0.30	0.13	0.30	7 + 2	26	0.26
Kouvola-Lahti 8.00-12.00	1.38	0.52	0.87	0.63	9 + 2 + 1	22	0.35

Lahti–Kouvola-suunnan aikaväleistä 8.00–12.00 on heterogeenisempi kuin 2.00–6.00: jälkimmäisellä aikavälillä on pelkästään erittäin pienien nopeuserojen tavarajunia varsin tasaisin junavälein. Tämän takia junien lisäämismahdollisuudessakin on suuri ero aikavälien kesken. Vaikka aikavälillä 8.00–12.00 on kaksi junaa enemmän, junamäärä on molemmilla aikaväleillä niin pieni, ettei se selitä eroa. SAHR-arvojen välillä on vain pieni ero, koska junien nopeuseroista huolimatta saapumisaikavälit voivat olla tasaisia. Aikavälin päissä olevat nopeuserot voivat jopa kasvattaa keskimääräistä saapumisaikaväliä.

Kouvola–Lahti-suunnan aikaväli 8.00–12.00 on selkeästi heterogeenisempi kuin 2.00–6.00, ja sen junien lisäämismahdollisuus on suhteessa selkeästi huonompi. Junien ryhmittely lisäisi liikenteen homogeenisuutta. Aikavälillä 2.00–6.00 junat on ryhmitelty suhteellisen lähekkäin oleviin pareihin, mutta niiden välillä on pidemmät, tasaiset välit. Aikavälin alussa olevan hitaan tavarajunan nopeuttaminen ei nostaisi kummankaan mittarin arvoja – junaparin lähtöaikaväli on saapumisaikaväliä pidempi – mutta parantaisi muutamalla junalla junien lisäämismahdollisuutta. Kuvissa 63 ja 64 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta.



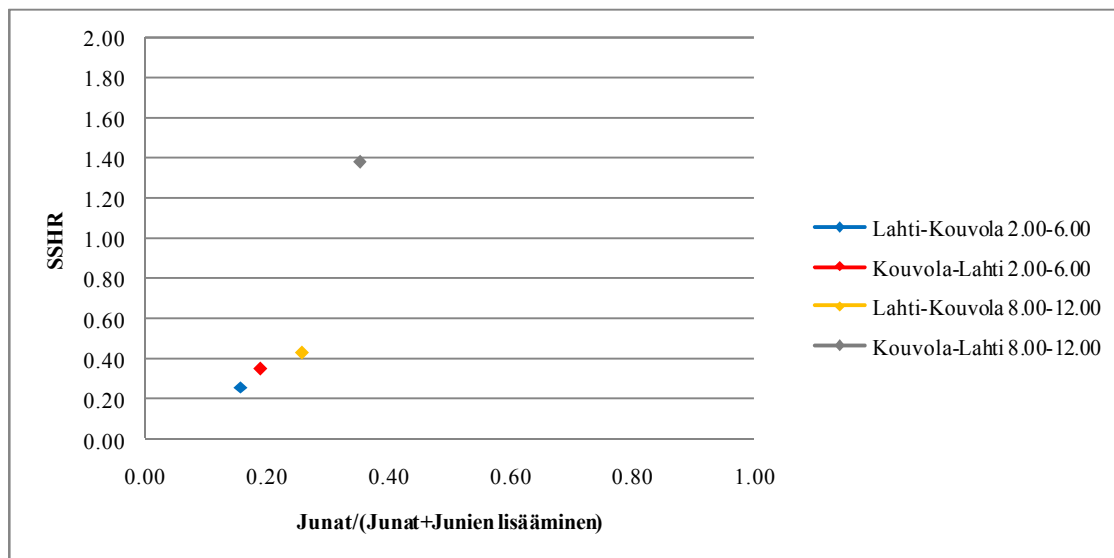
Kuva 63. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.



Kuva 64. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.

Aikavälin 2.00–6.00 liikenne on molempiin suuntiin nopeudeltaan homogeenista ja niissä on sama määrä junia. Mittarien ja junien lisäämismahdollisuuden erot johtuvat junaväleistä ja junien ryhmittelystä. Aikavälin 8.00–12.00 liikenne on etenkin Kouvola–

Lahti-suunnassa heterogeenista, minkä takia junien lisäämismahdollisuus huononee. Kyseisellä suunnalla junamäärä on kasvanut niin suureksi, että aikataulussa vuorotellen olevien tavara- ja matkustajajunien nopeuserot aiheuttavat väistämättä suhteellisen pieniä junavälejä. Tämän takia mittarien arvojen erotus on suhteellisen suuri. Lahti–Kouvola-suunnan *SAHR*-arvo jää aikavälin 2.00–6.00 molempien suuntien vastaavia arvoja pienemmäksi, koska liikenteen heterogeenisuus vaikuttaa kriittisemmin sen lähtöaikaväleihin. Kuvassa 65 on esitetty *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 65. Lahti–Kouvola-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketun *SSHHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

Junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarin arvon kasvu nostaa myös *SSHHR*-arvoa. Kouvola–Lahti-suunnan aikavälin 8.00–12.00 arvo olisi lähtökohtaisesti selkeästi pienempi, ellei aikavälin aikataulurakenne poikkeaisi niin selkeästi muista, homogeenisemmista tapauksista. Tämä osoittaa, kuinka paljon kaltevuudeltaan erilaisten aikatauluviivojen sijainnilla aikataulussa on merkitystä suhteellisen pienellä liikennesuoritteella.

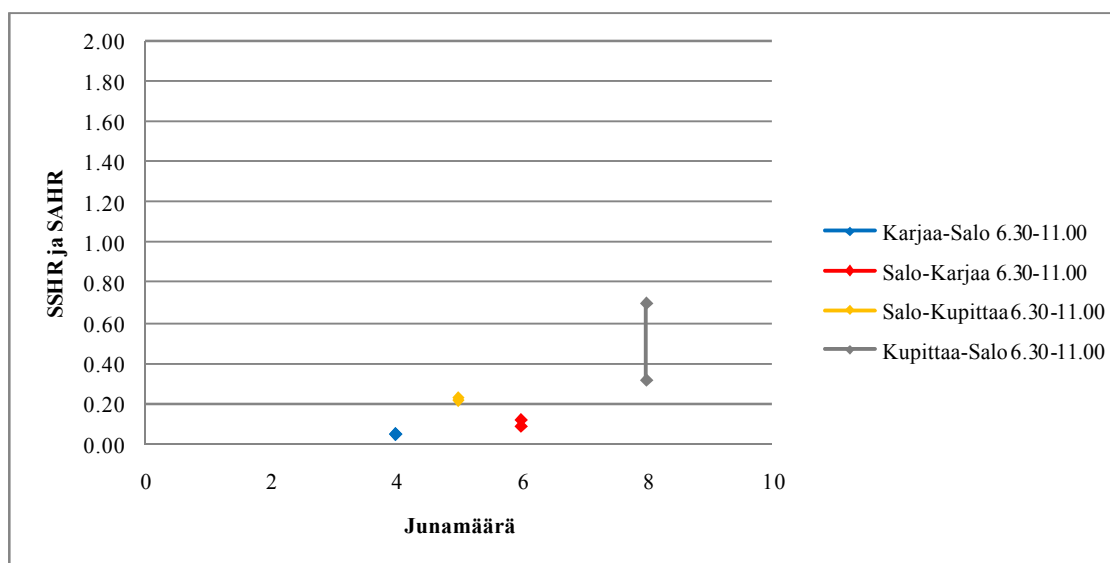
7.1.3 Karjaa–Salo–Kupittaa

Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Karjaa–Salo–Kupittaa-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D6)

Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
Karjaa-Salo 6.30-11.00	0.05	0.05	0.00	0.01	4		
Salo-Karjaa 6.30-11.00	0.12	0.08	0.03	0.27	5		1
Salo-Kupittaa 6.30-11.00	0.23	0.22	0.01	0.05	5		
Kupittaa-Salo 6.30-11.00	0.70	0.32	0.38	0.55	7	1	

Karjaa–Kupittaa-suunnan Karjaa–Salo- ja Salo–Kupittaa-rataosilla on samat matkustajajunat, mutta jälkimmäisellä kulkee lisäksi tavarajuna. Sen läsnäolo kasvattaa mittarien arvoja suhteessa hyvin selkeästi ja liikenteen heterogeenisuuttakin hieman. Kupittaa–Karjaa-suunnan Kupittaa–Salo- ja Salo–Karjaa-rataosilla on myös samat kaukojunat, mutta ensiksi mainitulla kulkee kaksi tavarajunaa, joista toisella on junaohitus matkustajajunan kanssa. Sen mittarien arvot ja liikenteen heterogeenisuus ovat siksi selkeästi korkeammat. Kuvassa 66 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä.



Kuva 66. Karjaa–Salo–Kupittaa-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.

Mittarien arvojen ja junamäärän välillä on hyvin vähäinen riippuvuus: junamäärä on pieni, minkä takia se ei sanele junavälejä. Lisäksi, junavälit ovat keskimäärin suuria, eikä junien nopeuseroilla ole suurta merkitystä mittarien arvoihin elleivät ne ole suuria tai sijaitse kriittisissä kohdissa. Kupittaa–Salo-suunnan aikavälin 6.30–11.00 nopeuserot ovat hyvin suuret ja aiheuttavat pieniä aikavälejä. Tästä johtuen sen *SSHR*-arvo on selkeästi korkeampi kuin muissa tapauksissa. Junamäärän kasvun takia *SAHR*-arvo olisi joka tapauksessa hieman korkeampi kuin muissa tapauksissa, koska tapausten välillä ei ole eroja matkustajajunien nopeuksissa ja junaväleissä.

7.1.4 Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi

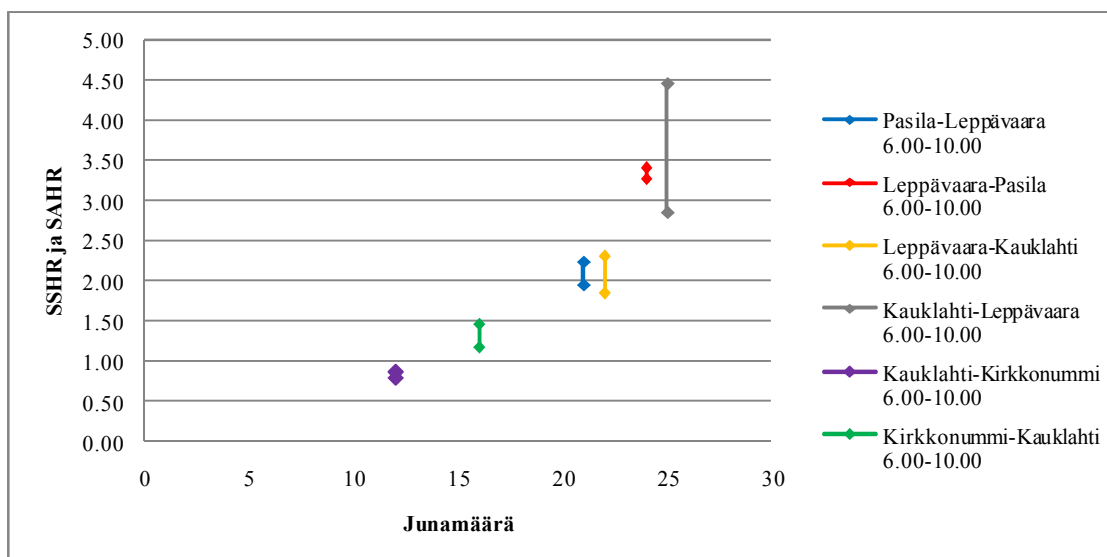
Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D7)

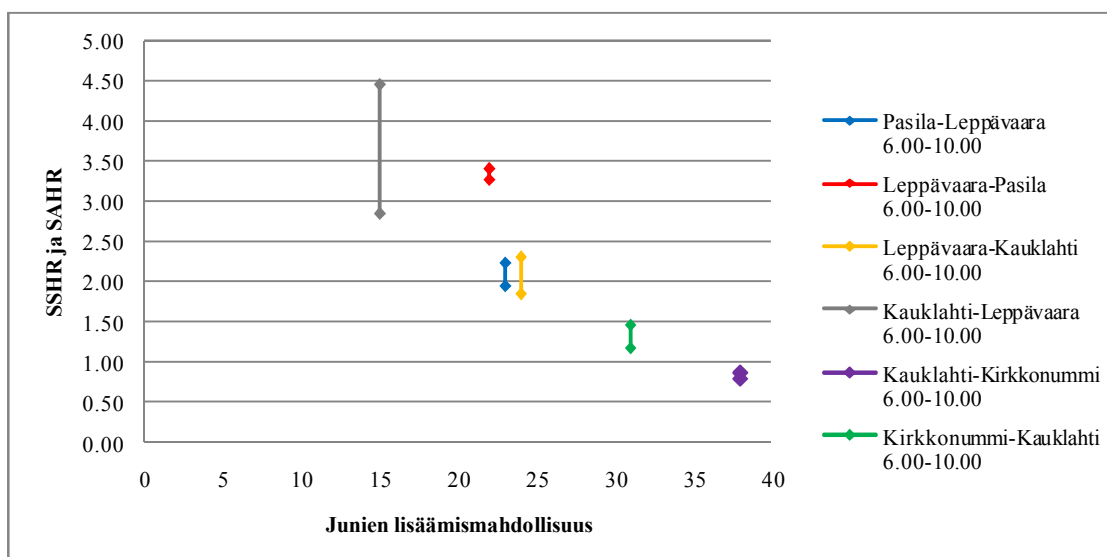
Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Pasila-Leppävaara 6.00-10.00	2.24	1.94	0.30	0.13	19 + 1 + 1	23	0.44
Leppävaara-Pasila 6.00-10.00	3.42	3.27	0.15	0.04	23 + 1	22	0.48
Leppävaara-Kauklahti 6.00-10.00	2.31	1.85	0.46	0.20	19 + 1 + 2	24	0.46
Kauklahti-Leppävaara 6.00-10.00	4.45	2.84	1.61	0.36	24 + 1	15	0.54
Kauklahti-Kirkkonummi 6.00-10.00	0.87	0.80	0.07	0.08	12	38	0.24
Kirkkonummi-Kauklahti 6.00-10.00	1.46	1.17	0.29	0.20	14 + 1 + 1	31	0.34

Pasila–Kirkkonummi-suunnan rataosista Leppävaara–Kauklahtella SSHR-arvo on suurempi, mutta SAHR-arvo pienempi kuin Pasila–Leppävaaralla. Tämä johtuu siitä, että Leppävaara–Kauklahti-rataosa on pidempi ja lähijunien väliset saapumisaikavälit nopeampien kaukojunien kanssa kasvavat rataosan loppua kohden selkeästi lähtöaikavälejä suuremmiksi. Kaikki kaukojunat, mutta vain osa lähijunista, jatkavat Kauklahti–Kirkkonummi-rataosalle. Lisäksi, lähi- ja kaukojunien lähtö- ja saapumisaikavälien erot ovat vähäisempiä. Tämän takia rataosan SSHR on selkeästi pienin ja liikenne homogeenisinta.

Kirkkonummi–Pasila-suunnan rataosista Kauklahti–Leppävaaralla on eniten junia ja sen liikenne on heterogeenisinta. Tämän takia sen SSHR-arvo on selkeästi korkein. Leppävaara–Pasila-rataosan liikenne on nopeudeltaan erittäin homogeenista, mutta sillä on muutamia erittäin pieniä junavälejä. Siksi sen SAHR-arvo on korkein. Kirkkonummi–Kauklahti-rataosalla kulkee selkeästi vähiten junia ja sillä on vain kaksi pientä junaväliä kauko- ja lähijunien välillä. Tämän takia sen SSHR ja SAHR ovat selkeästi pienimmät ja liikenne Kauklahti–Leppävaaraa homogeenisempaa. Kuvissa 67 ja 68 on esitetty SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuudet junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta.

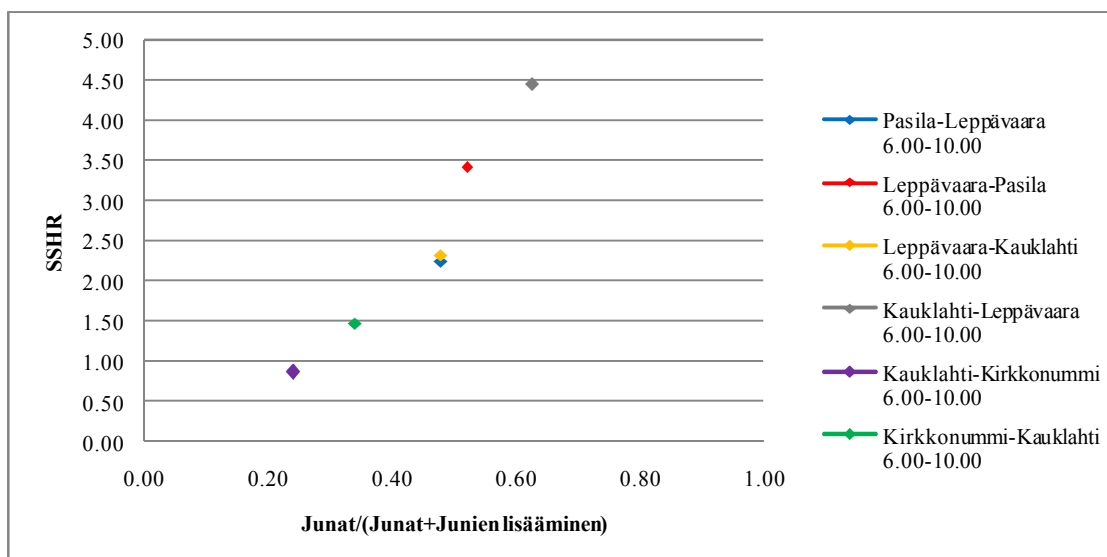


Kuva 67. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.



Kuva 68. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.

Mittareilla on selkeä riippuvuus junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta: rataosilla on niin paljon liikennettä, että junamäärän kasvaessa junien nopeuseroista aiheutuu pieniä lähtö- ja saapumisaikavälejä. Aikataulurakenteella on kuitenkin merkitystä mittareihin, mikä käy ilmi Leppävaara–Pasila-suunnan aikavälistä 6.00–10.00: muutama erittäin pieni junaväli mahdollistaa SSHR-arvoon nähden erinomaisen junien lisäämismahdollisuuden, vaikka junamäärään nähden molempien mittarien arvot ovat suuria. Kuvassa 69 on esitetty SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 69. Pasila–Leppävaara–Kauklahti–Kirkkonummi-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

Mittarien välillä on selkeä riippuvuus: *SSHR*-arvo suurenee junamäärän kasvaessa. Kasvu on voimakkaampaa *SSHR*-arvoltaan kolmen suurimman kuin kolmen pienimmän tapauksen välillä, joten häiriösietoisuuden heikkeneminen voimistuu lähestyttyessä aikataulun maksimijunamäärää.

7.1.5 Oulunkylä–Kerava

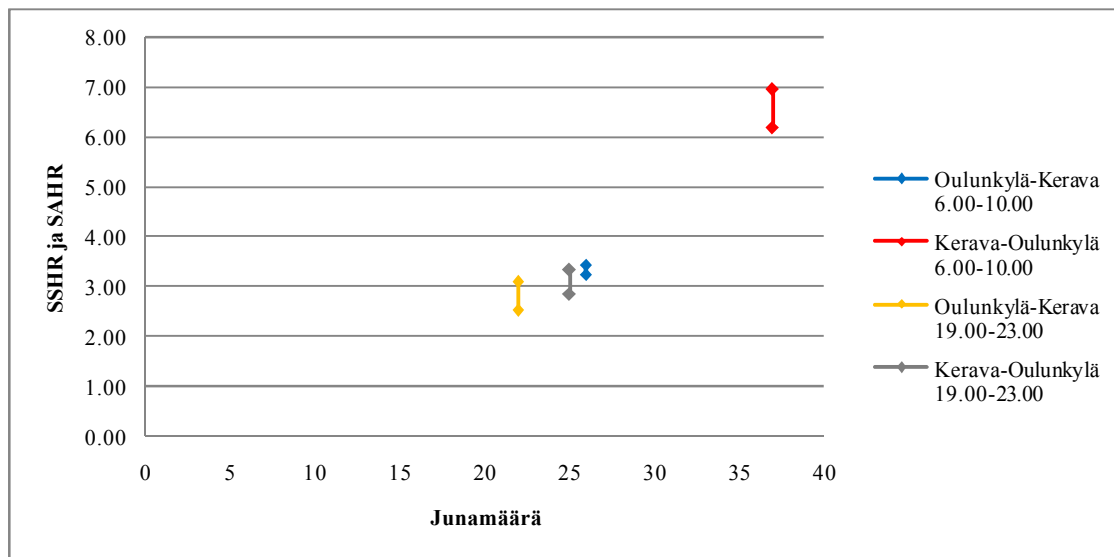
Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketut mittarit ja junamäärät (liitteet D8–9)

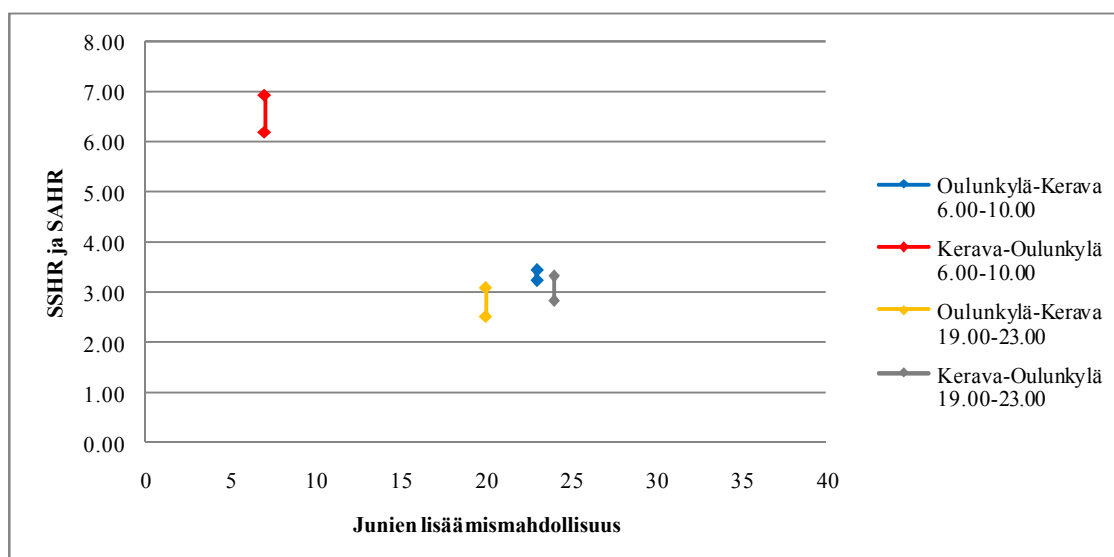
Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Oulunkylä–Kerava 6.00-10.00	3.43	3.24	0.20	0.06	23 + 2 + 1	23	0.53
Kerava–Oulunkylä 6.00-10.00	6.95	6.19	0.76	0.11	33 + 2 + 2	7	0.84
Oulunkylä–Kerava 19.00-23.00	3.09	2.51	0.58	0.19	18 + 2 + 2	20	0.52
Kerava–Oulunkylä 19.00-23.00	3.35	2.86	0.49	0.15	21 + 2 + 2	24	0.51

Oulunkylä–Kerava-suunnan aikaväleistä 6.00–10.00 saa suuremmat *SSHR*- ja *SAHR*-arvot kuin 19.00–23.00. Jälkimmäisen aikavälin selkeästi suuremman heterogeenisuuden takia ensimmäisen aikavälin junien lisäämismahdollisuus on parempi, huolimatta sen suuremmasta junamäärästä. 19.00–23.00 aikavälin heterogeenisuutta lisää kolmen kaukojunan normaalia pidemmät asemilla pysähdykset, minkä takia niiden saapumisaikavälit seuraavan junan kanssa ovat lähtöaikavälejä selkeästi lyhyemmät.

Kerava–Oulunkylä-suunnan aikaväleistä 6.00–10.00 sisältää kaikista tapauksista selkeästi eniten junia ja sen *SSHR*- ja *SAHR*-arvot ovat myös selkeästi suurimmat. Aikaväli 19.00–23.00 vertautuu hyvin vastakkaisen suunnan aikaväliin 6.00–10.00, jossa on lähes sama junamäärä, mutta keskimäärin pienemmät junien nopeuserot. Kerava–Oulunkylä-suunnan junien lisäämismahdollisuus on parempi, koska sen junaväleissä on vähemmän junien lisäämiselle sopimatonta aikaa. Siinä ei vastakkaista suuntaa pienemmän *SSHR*:n perusteella ole kuitenkaan liikaa pieniä junavälejä. Sen *SAHR* on suhteessa vieläkin pienempi, joten nopeuserot eivät aiheuta liian pieniä saapumisaikavälejä. Kuvissa 70 ja 71 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuudet junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta.



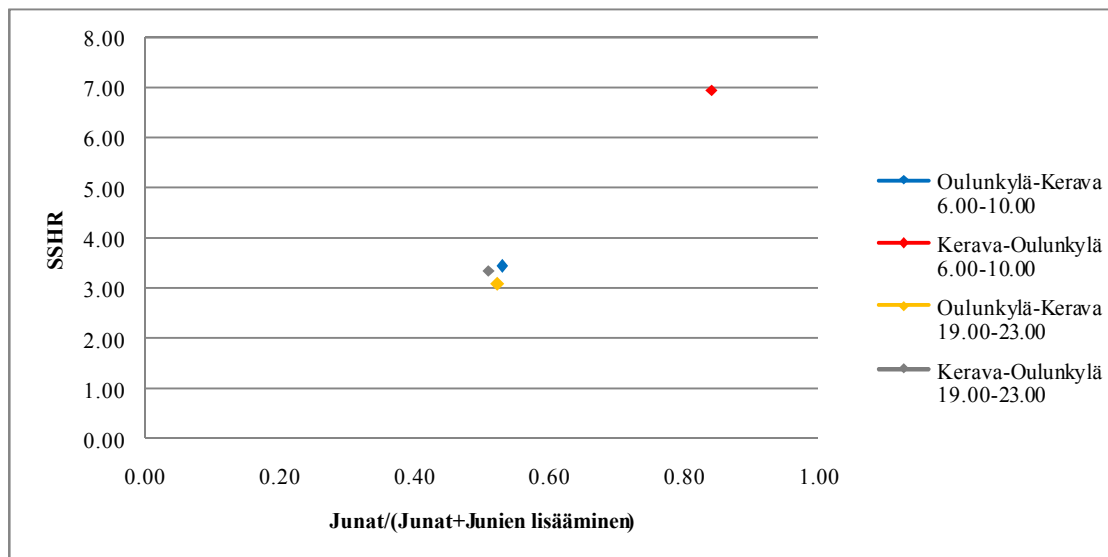
Kuva 70. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus.



Kuva 71. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus.

Junamäärän kasvu nostaa mittarien arvoja. Junien lisäämismahdollisuuteen nähden Oulunkylä–Kerava-suunnan aikavälillä 19.00–23.00 mittareilla on pienet arvot, minkä

todettiin johtuvat junien lisäämismahdollisuuden kannalta pienestä hukka-ajasta junaväleissä. Junien lisäämismahdollisuus kuitenkin keskimäärin huononee mittarien arvojen kasvaessa. Kuvassa 72 on esitetty *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 72. Oulunkylä–Kerava-rataosan eri suunnille ja aikaväleille lasketun *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

Kolmen tapauksen *SSHR*-arvot ovat lähellä toisiaan. Niiden ja korkeimman *SSHR*:n saaneen tapauksen välistä *SSHR*:n saaneita tapauksia ei valitettavasti ole mukana tarkastelussa, mutta näiden havaintojen perusteella *SSHR*:n voidaan olettaa kasvavan junamäärän lähestyessä maksimiaan.

7.1.6 Vaihtoehtoiset aikataulut ja Kerava–Tikkurila – ei puskurijaksoa vs. puskurijakso

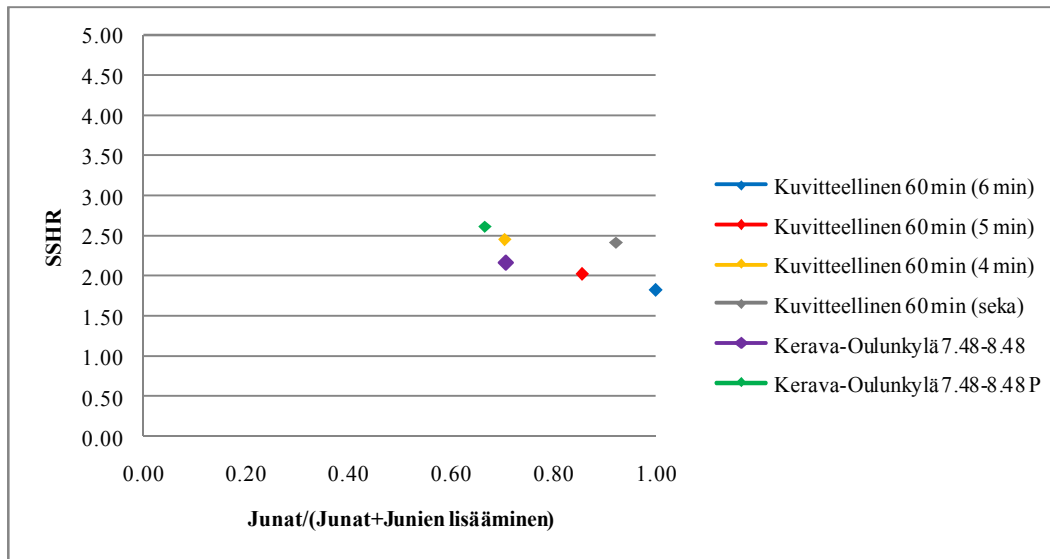
Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Kuvitteellisille rataosille ja Kerava–Tikkurila-rataosan eri aikataulurakenteiden samalle suunnalle ja aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät (liite D10)

Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Vaihtoehtoinen 60 min (6 min)	1.83	1.67	0.17	0.09	10 + 1 + 1	0	1.00
Vaihtoehtoinen 60 min (5 min)	2.03	1.97	0.07	0.03	10 + 1 + 1	2	0.86
Kuvitteellinen 60 min (4 min)	2.54	2.42	0.13	0.02	10 + 1 + 1	5	0.71
Kuvitteellinen 60 min (seka)	2.42	2.04	0.38	0.16	10 + 1 + 1	1	0.92
Kerava-Tikkurila 7.45-8.49	2.16	2.04	0.12	0.06	10 + 1 + 1	5	0.71
Kerava-Tikkurila 7.45-8.49 P	2.62	2.53	0.08	0.03	10 + 1 + 1	6	0.67

Vaikka kolmessa ylimmässä aikataulussa junien nopeuksien välillä ei ole eroja, niissä on sekä lähtevä että saapuva juna, minkä takia *SSHR*- ja *SAHR*-mittarit saavat hieman eri arvot. Jos saapuva- ja lähtevä juna olisivat tarkastelualueen ulkopuolella, mittarit saisivat saman arvon.

Junien lisäämiselle 4 minuutin junavälit pitkällä puskurijaksolla on selkeästi paras aikataulurakenne. Sen *SSHR*- ja *SAHR*-arvot ovat kuitenkin suurimmat. Vuorotelten 6 ja 4 minuutin lähtö- ja saapumisaikavälejä ja niiden seassa 2 sekä lähtö- että saapumisaikaväliltään 8 minuutin junaväliä sisältävä aikataulu on edellä mainittuja aikatauluja heterogeenisempi, mutta saa pienemmän *SSHR*:n ja *SAHR*:n kuin minimijunavälejä sisältävä aikataulu. Alkuperäiseen Kerava-Tikkurila-aikatauluun voidaan lisätä vähemmän junia kuin sen puristettuun vaihtoehtoon, vaikka sen *SSHR* on selkeästi korkeampi. Kuvassa 73 on esitetty *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 73. Vaihtoehtoisille aikatauluille ja Kerava–Tikkurila-rataosan eri aikataulurakenteiden samalle suunnalle ja aikavälille lasketun *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

Puristamattomien aikataulujen *SSHR*-arvo kasvaa junamäärän lähestyessä maksimiaan, kuten aiemmissa tarkasteluissa. Kaikissa puskurijakson sisältämissä aikatauluissa riippuvuus on päinvastainen. Tämä johtuu siitä, että junavälien ollessa järjestäen pienet jo valmiiksi (5–7 minuuttia, kun minimijunaväli on 4 minuuttia), niiden pienentäminen entisestään ja puskurijakson luominen parantavat junien lisäämismahdollisuutta suhteellisesti erittäin paljon; 5–7 minuutin junavälit eivät paranna junien lisäämismahdollisuutta minimijunaväliin nähden ollenkaan, mutta sellaisessa aikataulussa keskimääräiset viiveet jäävät pienemmiksi. Kuvattu ilmiö ei vaikuta syntyvän, kun junavälejä ei järjestäen puristeta lähelle minimiä.

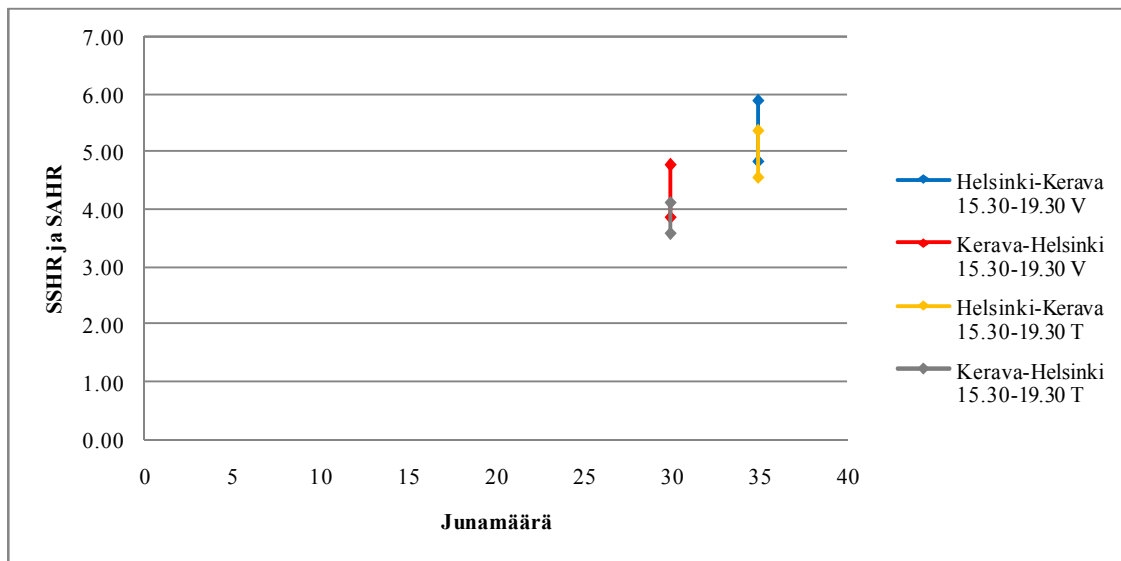
7.1.7 Helsinki–Kerava – vakioaikataulurakenne vs. tasajunaväliaikataulurakenne

Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 17.

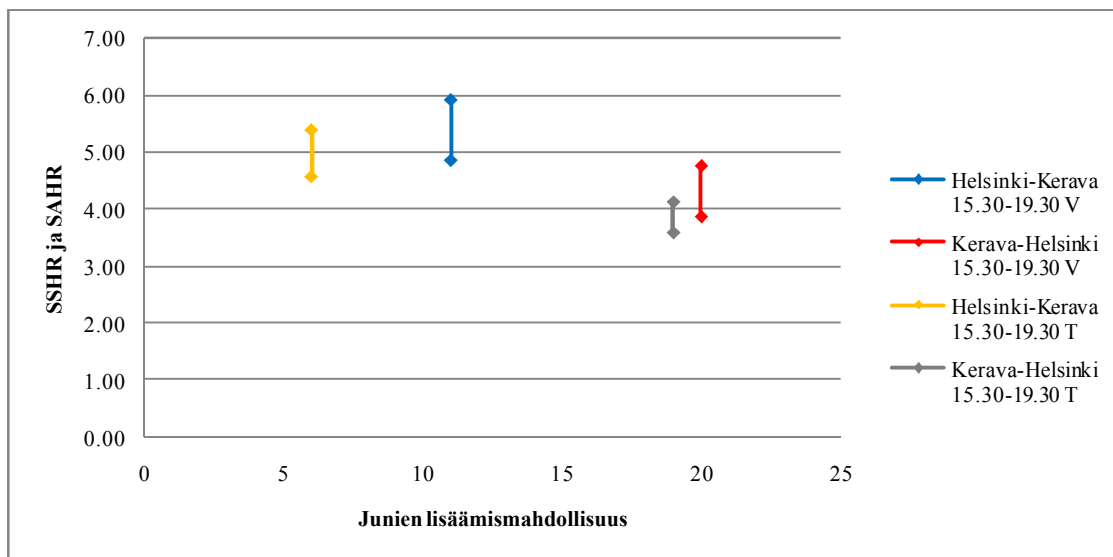
Taulukko 17. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketut mittarit vakio- ja tasavuoroaikataulurakenteissa ja junamäärät (liitteet D11-12)

Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Helsinki-Kerava 15.30-19.30 V	5.90	4.85	1.05	0.18	30 + 3 + 2	11	0.76
Kerava-Helsinki 15.30-19.30 V	4.76	3.85	0.91	0.19	24 + 3 + 3	20	0.60
Helsinki-Kerava 15.30-19.30 T	5.37	4.55	0.82	0.15	30 + 3 + 2	6	0.85
Kerava-Helsinki 15.30-19.30 T	4.13	3.59	0.53	0.13	24 + 3 + 3	19	0.61

Helsinki–Kerava-suunnan alkuperäinen vakioaikataulurakenne saa korkeammat *SSHR*- ja *SAHR*-arvot kuin vaihtoehtoinen tasajunaväliaikataulurakenne; sen junien lisäämismahdollisuus on kuitenkin parempi. Vaihtoehtoisen aikataulu liikenne on aavistuksen homogeenisempaa, mikä johtuu tasaantuneista junaväleistä. Kerava–Helsinki-suunnalla junien lisäämismahdollisuus on lähes yhtä hyvä vaihtoehtoisessa kuin alkuperäisessä aikataulussa. Alkuperäisen aikataulun *SSHR* ja *SAHR* ovat korkeammat ja sen liikenne on heterogeenisempaa. Kuvissa 74 ja 75 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuudet junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta.

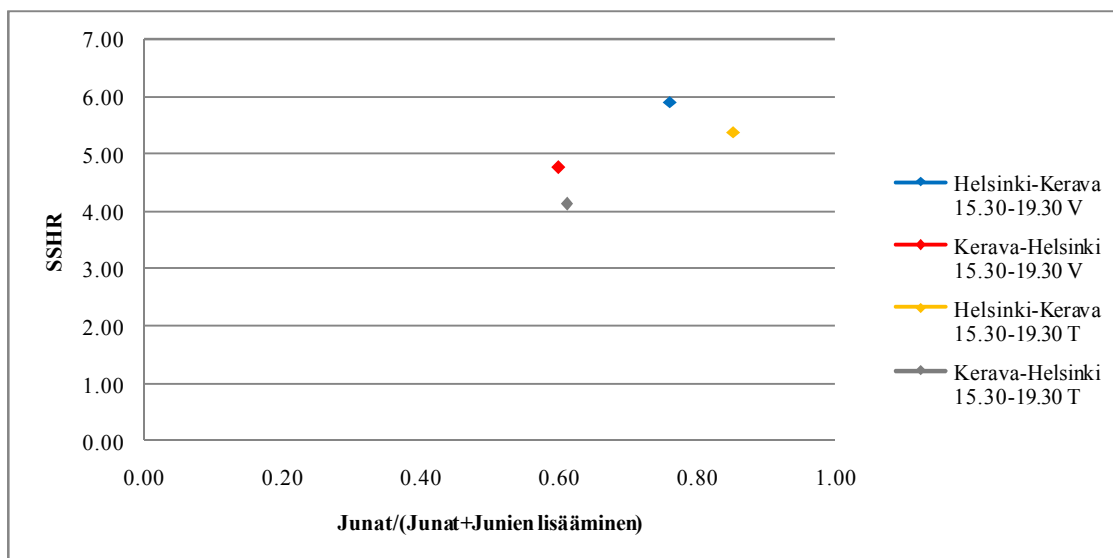


Kuva 74. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus eri aikataulurakenteissa.



Kuva 75. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus eri aikataulurakenteissa.

Molemmilla suunnilla tasaisemmat junavälit pienentävät mittarien arvoja, mutta heikentävät junien lisäämismahdollisuutta. Junamäärään nähden Kerava–Helsinki-suunnan vaihtoehtoinen aikataulu vähentää enemmän mittarien arvoja. Toisaalta, pienemmällä junamäärällä junavälien muuttamisella on suurempi vaikutus, koska niiden ei lähtökohtaisesti ole oltava missään kohtaa pieniä. Vakioaikataulurakenne parantaa junien lisäämismahdollisuutta tasajunaväliaikataulurakenteeseen nähden enemmän korkeilla junamäärillä, mistä on osoituksena Helsinki–Kerava-suunnan vähäisempi mittarien arvojen pieneneminen junien lisäämismahdollisuuteen nähden. Kuvassa 76 on esitetty SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 76. Helsinki–Kerava-rataosan eri suunnille ja samalle aikavälille lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista eri aikataulurakenteissa..

Vakioaikatauluissa *SSHR*-arvo on vaihtoehtoisia aikatauluja korkeampi suhteessa junamäärän ja sen maksimin suhteeseen. Kerava–Helsinki-suunnan aikataulujen välillä *SSHR*:ien erotus on suurempi suhteessa junamäärän kasvuun kohti maksimiaan.

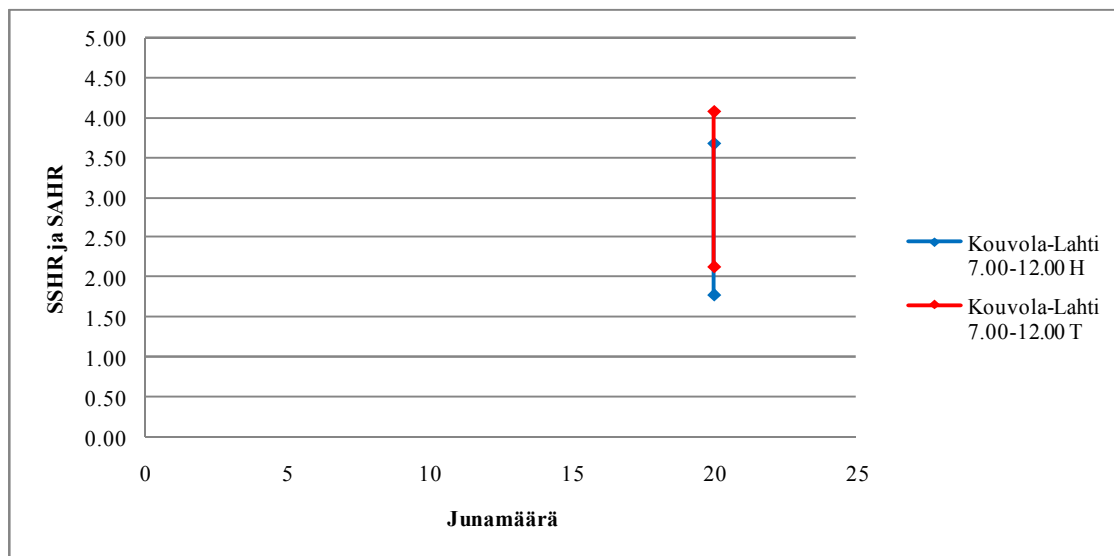
7.1.8 Lahti–Kouvola – matkustajajunaliikenteen vs. tavarajunaliikenteen priorisointi

Lasketut mittarit on esitetty taulukossa 18.

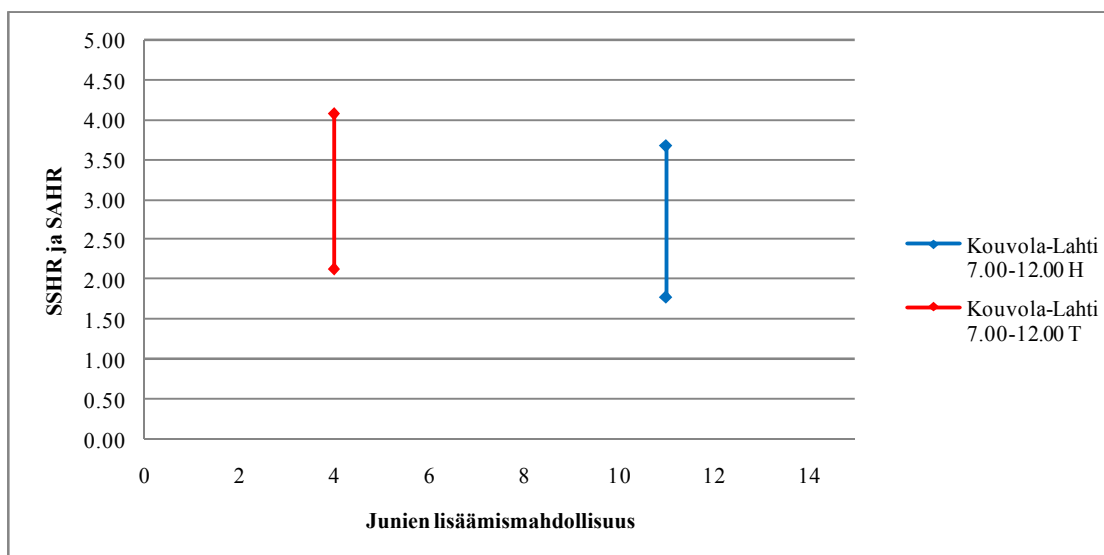
Taulukko 18. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle ja aikavälille lasketut mittarit ja junamäärät matkustajajunaliikenteen ja tavarajunaliikenteen priorisoivissa aikataulurakenteissa

Rataosa ja aikaväli	SSHR	SAHR	Erotus	Erotus/ SSHR	Lähtevät ja saapuvat + lähtevät + saapuvat junat	Junien lisäämis- mahdollisuus	Junat/ (Junat+ Junien lisääminen)
Kouvola-Lahti 7.00-12.00 H	3.68	1.77	1.91	0.52	16 + 2 + 2	11	0.65
Kouvola-Lahti 7.00-12.00 T	4.07	2.14	1.93	0.47	16 + 2 + 2	4	0.83

Matkustajajunat priorisoivan aikataulun *SSHR*- ja *SAHR*-arvot ovat pienemmät kuin tavarajunat priorisoivan aikataulun. Tavarajunat priorisoiva aikataulu on hieman homogeenisempi, mutta sen junien lisäämismahdollisuus on selkeästi huonompi. Kuvissa 77 ja 78 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuudet junamäärästä ja junien lisäämismahdollisuudesta.

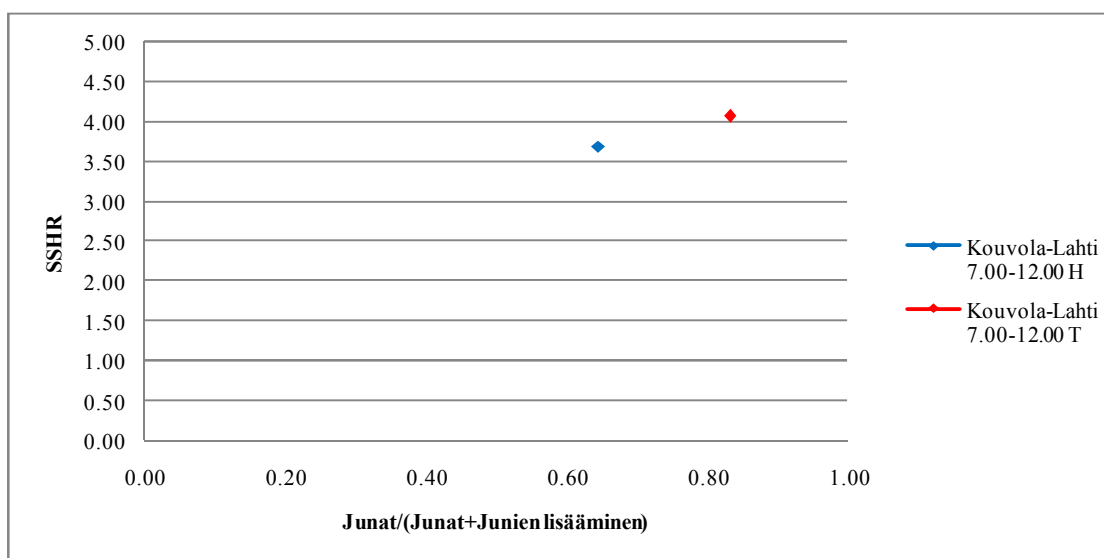


Kuva 77. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle ja aikavälille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä ja mittarien erotus matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.



Kuva 78. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle laskettujen SSHR- ja SAHR-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta ja mittarien erotus matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.

Molemmat aikataulut on rakennettu saman, junanopeuksiltaan heterogeenisen liikenteen pohjalta. Niissä on varsin paljon junia ja monia junaohituksia. Tämän takia aikataulujen välille ei ole saatu kovinkaan suurta eroa mittarien arvoihin. Monien junaohitusten takia aikatauluihin saadaan lisättyä lähtökohtaisesti vähän junia niiden *SSHR*-arvoihin nähden. Matkustajajunat priorisoivassa aikataulussa junat on ryhmitelty paremmin ja ne ovat hieman tiiviimmin tietyissä kohdissa, minkä takia sen junien lisäämismahdollisuus on suhteellisen hyvä. Kuvassa 79 on esitetty *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

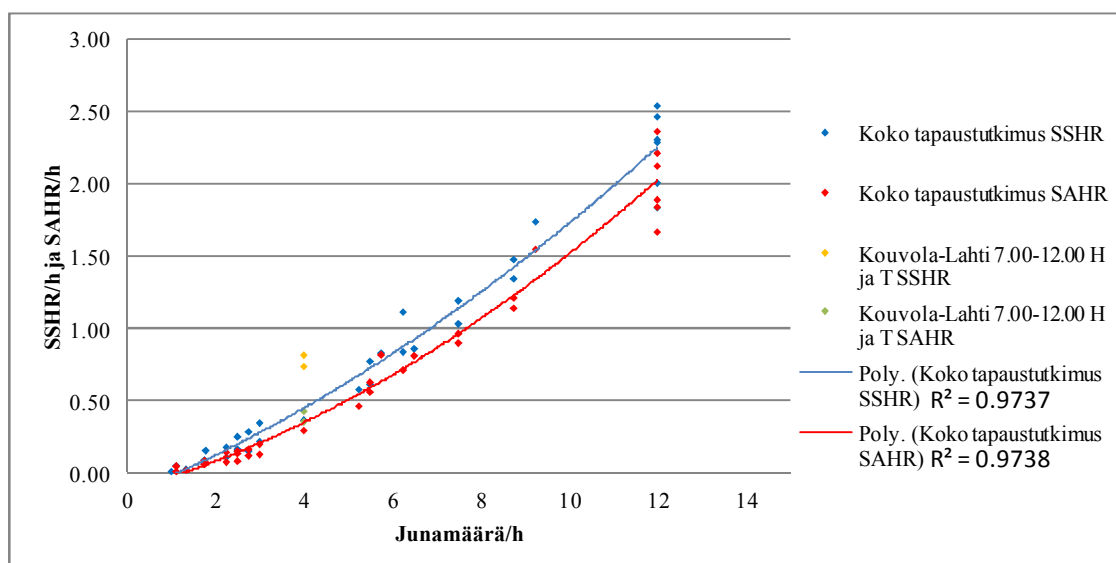


Kuva 79. Lahti–Kouvola-rataosan samalle suunnalle lasketun SSHR-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista matkustaja- ja tavarajunaliikenteet priorisoivissa aikataulurakenteissa.

Matkustajajunat priorisoivan aikataulun maksimijunamäärä on korkea tavarajunat priorisoivan aikatauluun nähden, kun eroa verrataan aikataulujen *SSHR*-arvoihin. *SSHR* kuitenkin kasvaa lähestyttäessä junamäärän maksimia.

7.2 Yhteenveto

Jotta kaikki aikataulut olisivat keskenään vertailukelpoisia, mittarien arvot laskettiin tuntia kohden. Kouvola–Lahti-rataosan matkustaja- ja tavaraliikenteet painottaville aikatauluille piirrettiin erikseen havaintopisteet, koska niissä on monia junaohituksia: ne aiheuttavat aikatauluun ylimääräisiä lähtö- ja saapumisaikavälejä, jotka väistämättä lisäävät liikenteen heterogeenisuutta. Kuvassa 80 on esitetty kaikille tutkituille tapauksille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä sekä regressiokäyrät selitysasteineen.

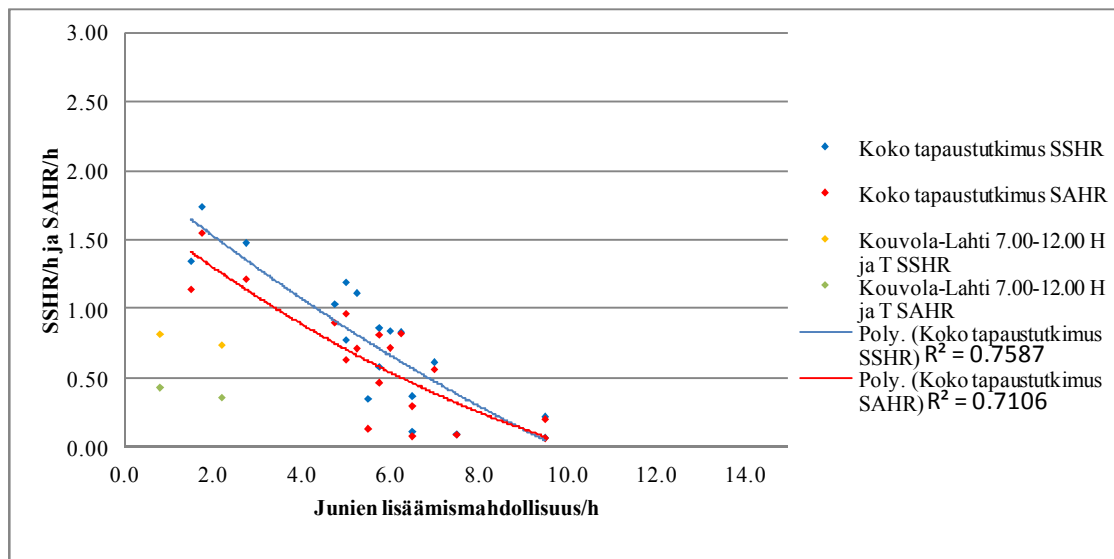


Kuva 80. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junamäärästä.

SSHR- ja *SAHR*-mittareilla on tapaustutkimuksen perusteella yhtä suuri, selkeä riippuvuus junamäärästä. Hajontaa aiheuttavat erot aikataulujen junaväleissä ja junien nopeuseroissa. Mittarien keskinäiseen eroon on vaikutusta nopeuseroilla ja aikataulun aikavälin alkupäässä mahdollisesti olevilla saapuvilla ja loppupäässä olevilla lähtevillä aikatauluviiivoilla. Liikenteeltään heterogeenisessa aikataulussa *SSHR*- ja *SAHR*-arvot ovat sitä lähempänä toisiaan, mitä suurempi osa lyhyistä aikaväleistä sijaitsee saapumisasemalla. Tämä on mahdollista sitä enemmän, mitä vähemmän aikataulussa on junia. Suurella junamäärällä liikenteen heterogeenisuus aiheuttaa väistämättä lyhyitä aikavälejä sekä lähtö- että saapumisasemalle.

Saman junamäärän sisältävien aikataulujen välillä voi olla selkeitä eroja niiden *SSHR*- ja *SAHR*-arvojen kesken etenkin pienillä junamäärillä, jolloin keskimääräiset junavälit ovat lähtökohtaisesti suuria. Tällöin aikatauluviivojen kaltevuutta voidaan muuttaa ilman, että junamäärä vähenee. Junamäärän ollessa vähäinen, muutamien pienien junavälien syntyminen myös kasvattaa mittarien arvoja suhteessa enemmän kuin junamäärän ollessa suuri. Tasaiset junavälit ja nopeudeltaan täysin homogeenisia junia sisältävä aikataulu saa annetulla junamäärällä pienimmät mittariarvot.

Tulokset todentavat olettamuksen liikenteen heterogeenisuuden mittarien arvojen ja junamäärän positiivisesta korrelaatiosta (98 %:n selitysasteet): junatiheyden kasvu pienentää keskimääräisiä junavälejä. Mittarien arvojen kasvu voimistuu junamäärän kasvaessa, joten riippuvuus ei ole lineaarinen. Kirjallisuusselvityksen perusteella aikataulun häiriösietoisuuden heikkeneminen on korkeilla junamäärillä heterogeenisuuden mittarien arvojen heikkenemistä voimakkaampaa (luku 3.4, kuva 22), joten häiriösietoisuuden riippuvuus mittarien arvoista ei ole myöskään lineaarinen. Tulokset kuitenkin todentavat olettamuksen niiden välisestä negatiivisesta korrelaatiosta (luku 3.7.2, kuvat 35–36). Kuvassa 81 on esitetty *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta.



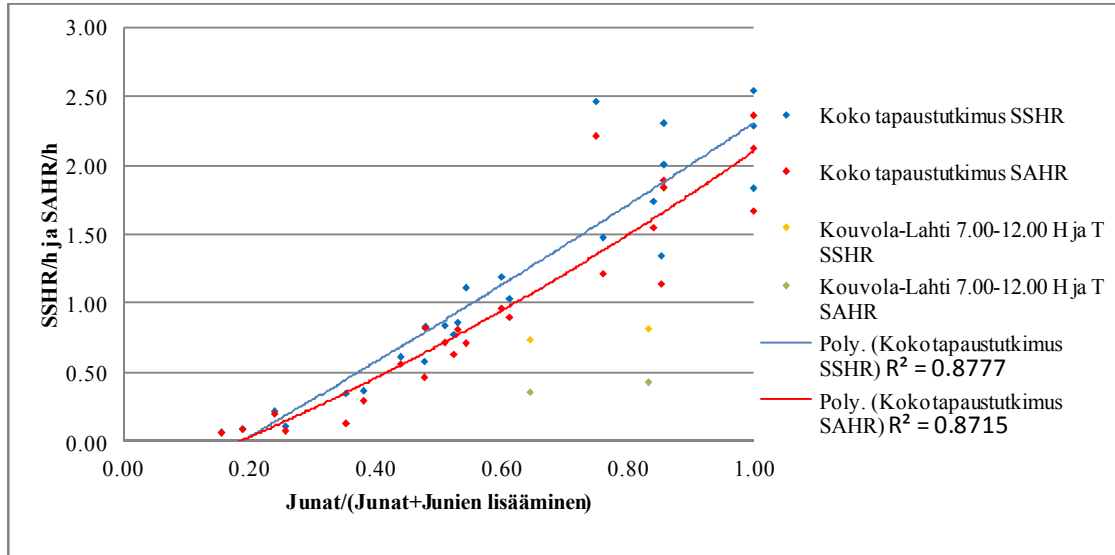
Kuva 81. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuus junien lisäämismahdollisuudesta.

Junien lisäämismahdollisuuden tarkastelussa *SSHR*-mittari on *SAHR*-mittaria parempi, koska se huomioi junavälit sekä lähtö- että saapumisasemalla. *SAHR*:lla on tapaustutkimuksen perusteella kuitenkin lähes yhtä selkeä riippuvuus lisäämismahdollisuudesta (selitysaste 71 %) kuin *SSHR*:lla (76 %). Kouvola–Lahti-aikataulujen lisäämismahdollisuus on poikkeuksellisen heikko: junaohitusten määrän kasvaessa se vähenee suhteessa *SSHR*- ja *SAHR*-arvojen kasvua paljon enemmän.

Hajontaa mittarien arvojen ja junien lisäämismahdollisuuden riippuvuuteen aiheuttavat erot aikataulujen junaväleissä, junien nopeuksissa ja junien ryhmittelyssä. Kun aikataulu on riittävän homogeeninen ja sen junamäärä niin suuri, että junavälit ovat keskimäärin pieniä, junien tiivistäminen minimijunaväleihin nostaa *SSHR*-arvoa suhteessa vähemmän kuin lisäämismahdollisuus nousee. Lisäämismahdollisuus on mahdollisimman hyvä, kun junien välillä ei ole nopeuseroja ja junavälit ovat minimijunavälin pituuden kerrannaisia. Heterogeenisen aikataulun *SAHR* on annetulla lisäämismahdollisuudella mahdollisimman pieni, kun hitaat junat lähtevät nopeiden junien jälkeen ja saapumisaikavälien keskihajonta on mahdollisimman pieni.

Tulokset tarkoittavat, että liikenteen heterogeenisuuden mittarien arvot paranevat junien lisäämismahdollisuuden kasvaessa. Riippuvuus ei ole yhtä selkeä kuin junamäärän kanssa, koska junamäärän ohella sekä lähtö- että saapumisaikavälien jakaumat

vaikuttavat lisäämismahdollisuuteen. Junamäärän ja lisäämismahdollisuuden yhtäaikainen tarkastelu on siksi aiheellista. Lisäämismahdollisuuden väheneminen tarkoittaa ratakapasiteetin käyttöasteen kasvua: sillä on negatiivinen korrelaatio aikataulun häiriösietoisuuden kanssa. Kuvassa 82 on esitetty *SSHR*-mittarin riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.



Kuva 82. Kaikille tutkituille tapauksille laskettujen *SSJR*- ja *SAJR*-mittarien riippuvuus junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista.

SSJR- ja *SAJR*-mittarit korreloivat positiivisesti junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarin kanssa käytännössä samoilla selitysasteilla (*SSJR*:lla 88 %, *SAJR*:lla 87 %). Mittarien arvojen hajonta on suurempaa lähellä maksimia, mikä saattaa osittain johtua paljon havaintopisteitä kyseisellä alueella aikaansaaneesta herkkyydestä. Osittain tai jopa suuressa määrin se johtuu siitä, että korkealla junamäärällä puskurijakso parantaa junien lisäämismahdollisuutta voimakkaasta *SSJR*:n kasvusta huolimatta. Kouvola–Lahti-aikataulujen *SSJR* ja *SAJR* ovat poikkeuksellisen pienet niiden junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarien arvoihin nähden: junaohitusten suuren määrän takia lisäämismahdollisuus on huono varsin pienestä junamäärästä huolimatta.

Tulokset liikenteen heterogeenisuuden mittarien riippuvuudesta junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittariin vertautuvat loogisesti Landexin et al. (2006b) havaintoon ratakapasiteetin käyttöasteen ja täsmällisyyden välisestä riippuvuudesta (luku 3.9.1, kuva 43). Vaikka tapaustutkimuksen regressiokäyrä ei ole yhtä kupera, täytyy muistaa ratakapasiteetin käyttöasteen eroavan hieman junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista. Lisäksi, *SSJR*- ja *SAJR*-arvojen negatiivinen korrelaatio aikataulun häiriösietoisuuden kanssa ei ole lineaarinen.

Yauanin ja Hansenin (2007) ja Liikenneviraston (2010c) tarjoamat ratkaisut häiriösietoisuuden lisäämiseksi – junien pysähdysaikojen lyhentäminen, junien nopeuksien tasaaminen, vakioaikataulurakenteen hylkääminen ja junamäärän vähentäminen – parantavat myös mittarien arvoja. Niihin vaikuttavat myös tekijät, joiden Carey (1999) mainitsee erityisesti heijastavan aikataulun luotettavuutta: junien lähtöväli sekä junavälien jakauma ja keskihajonta.

Aikataulussa ei pitäisi ruuhka-aikana olla junien nopeuseroja lisääviä tavarajunia ratakapasiteetin käytön tehokkuudenkin kannalta (Schittenhelm 2011). Vromans (2006) toteaa kansallisten rautatieverkkojen liikenteen olevan väistämättä heterogeenista tiettyinä aikaväleinä, koska matkustaja- ja tavarajunat käyttävät samoja raiteita. Junavälit pitäisi silti suunnitella mahdollisimman tasaisiksi etenkin pitkille etäisyyksille viiveiden ketjuuntumisen vähentämiseksi.

Jos liikenteestä kuitenkin halutaan homogeenista, nopeita kaukojunia on hidastettava. (Vromans 2005.) Ratkaisun soveltaminen esimerkiksi Lahti–Kouvola-rataosalle on hankalaa, koska kaukojunien kulku on sovitettu myös rataosan ulkopuolelle. Lisäksi, matkustajat toivovat mahdollisimman nopeita matka-aikoja. Jos liikenne koostuu käytännössä vain kauko- ja lähijunista, kuten Pasila–Kirkkonummi-rataosalla ruuhka-aikana, liikenteestä saadaan helpoiten homogeenista tasaamalla junien asemilla pysähdysten määrä. Sillä on kuitenkin haitallisia vaikutuksia matkustajille: kaukojunien matka-aika kasvaa tai lähijunayhteyksien määrä väliasemille vähenee (Vromans 2005).

Kuten UIC (2004) huomauttaa, käyttämättä jäänyt ratakapasiteetti ei automaattisesti mahdollista junien lisäämistä. Kapasiteettia ei ole järkevää käyttää junaväleihin tarvittavaa määrää enemmän, jollei junien lisäämismahdollisuus parane kyseisillä junaväleillä tai jos junien lisäämisen jälkeen jäisi tarpeettoman paljon minimijunaväliä pidempi aikaväli. Tapaustutkimuksessa *SSHR*- ja *SAHR*-mittarien riippuvuuteen junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittarista syntyykin hajontaa osittain siksi, että aikataulujen kesken on eroa lisäämismahdollisuuden osalta hukkaan menevän kapasiteetin määrässä.

Carey (1999) ja Vromans (2005) toteavat, että kapasiteetin käyttöasteen suurin ongelma mittarina on sen perustuminen junavälien summaan eikä yksittäisiin junaväleihin, minkä takia se kätkee tietoa junien lisäämismahdollisuudesta. Junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittari on tämän takia ratakapasiteetin käyttöastetta parempi mittari. Tapaustutkimuksessa havaittiin vakioaikataulurakenteilla olevan paras lisäämismahdollisuus, mikä on linjassa Schittenlhemmin (2011) näkemyksen kanssa.

8 YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA JATKOSUOSITUKSET

8.1 Yhteenveto

Kaikille palvelutasotekijöille löydettiin kirjallisuusselvityksellä ja asiantuntijahaastatteluilla vahvoja kytköksiä aikataulun kokonaispalvelutasoon. Palvelutasotekijöiden esittelyssä huomioitiin sekä liikenteen että matkustajien näkökulma, ja niissä viitataan usein aikataulun häiriösietoisuuteen. Esittely muodostaa loogisen, helposti hahmotettavan kokonaisuuden, johon aikataulun palvelutaso perustuu.

Osalle palvelutaso- ja niiden osatekijöistä – pelivaralle, aikataulutetulle odotusajalle, junamäärälle, ratakapasiteetin käyttöasteelle – löytyi lähtökohtaisia suositusarvoja. Osalle – junan aikataulunmukaiselle ajoajalle, junan ajoajan lisäosalle, pysähdysajalle, kääntöajan puskuriajalle, kohtaus- ja ohituspaikkojen sekä junalinjojen määrälle ja liikenteen heterogeenisuudelle (junavälit ja junien nopeuserot) – löytyi eri tapauksille piirrettyjä ja eri tekijöistä riippuvia kuvaajia. Eniten kuitenkin löytyi kuvailevia suosituksia; ainoastaan niitä löytyi vaihtoajalle, junavälin puskuriajalle, kalustokierrolle, vaihtoyhteyksille, aikataulurakenteelle.

Aikataulun häiriösietoisuus on seuraus muista palvelutasotekijöistä, ja sille voidaan suositusarvojen sijaan asettaa laatutavoite. Sen toteutumista voidaan arvioida viiveiden määrän ja keskiarvon pohjalta, kun tietoa niistä on saatavilla. Jos tietoa ei ole saatavilla, viiveitä voidaan arvioida tiettyjen palvelutasotekijöiden (esimerkiksi junamäärä, liikenteen heterogeenisuus, ratakapasiteetin käyttöaste) pohjalta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että häiriösietoisuus voidaan määrittää viiveiden arviointiin soveltuvien palvelutasotekijöiden perusteella. Häiriösietoisuuden tärkeyden takia ne myös asettavat erityisen kriittisiä reunaehtoja aikataulusuunnitteluun.

Palvelutasotekijöiden riippuvuussuhteiden tunnistaminen ja ymmärtäminen on tärkeää kokonaisvaltaiselle aikataulusuunnittelulle. Niiden perusteella voidaan ainakin karkeasti myös arvioida palvelutasotekijöiden suositusarvoja. Tämän takia niitä kuvattiin työssä mahdollisimman paljon. Niiden hahmotettavuutta lisättiin mahdollisuuksien mukaan a) eurooppalaisilla ja kotimaisilla käytännön esimerkeillä ja b) tekstiä tukevilla, helposti hahmotettavilla kuvilla. Lisäksi, riippuvuussuhteista ja niiden (positiivisia tai negatiivisia) korrelaatioista voidaan johtaa lisää riippuvuussuhteita.

Riippuvuussuhdekuvaajia esitettiin liikenteen täsmällisyyden, viiveiden tai aikataulun häiriösietoisuuden riippuvuudesta seuraavien palvelutasotekijöiden kanssa:

- kääntöajan puskuriaika (junan ajoajan osatekijä)
- pelivara (junan ajoajan osatekijä)
- junien ja junalinjojen määrä
- liikenteen heterogeenisuus
- ratakapasiteetin käyttöaste.

Kuvaajia esitettiin myös seuraaville riippuvuussuhteille:

- junan ajoajan lisäosa (pelivara ja puskuriaika)–yhteiskuntataloudellisuus
- ohitus- ja kohtauspaikkojen määrä–junien keskimääräisen ajoajan kasvu
- junamäärä–junien keskimääräisen ajoajan kasvu

- aikataulun suurin mahdollinen junamäärä–liikenteen heterogeenisuus
- junien nopeusero–ratakapasiteetin käyttöaste

Riippuvuussuhteet ovat usein moniulotteisia: yhden palvelutasotekijän arvon muuttaminen vaikuttaa muutaman muun arvoihin, tilanteesta riippuvalla voimakkuudella ja (positiivisella tai negatiivisella) korrelaatiolla. Tämä lisää aikataulusuunnittelun haasteita ja tekee aikataulun palvelutason arvioinnista moniselitteistä. Riippuvuussuhteiden takia aikataulu on periaatteessa tietyillä painotuksilla tehty palvelutasotavoitteiden kompromissi: on mahdotonta luoda aikataulu, jossa jokaisen palvelutasotekijän laatu on erinomainen.

Palvelutasotekijöiden laadun määrittämiseksi niille voidaan aikataulusta mitata suoraan arvot tai määrittää ne menetelmillä, joiden käyttökelpoisuus ja soveltuvuus riippuvat tilanteesta. Mitattavat palvelutasotekijät saavat yksiselitteisiä ja vertailukelpoisia arvoja; määrittämismenetelmät antavat mittariarvoja, jotka eivät ole vertailukelpoisia muiden mittarien arvojen kanssa.

Suomen rautatieliikenteen osapuolten palvelutasotavoitteita ja aikataulusuunnittelun prioriteetteja käsitellään aikaisemmissa julkaisuissa varsin yleisellä tasolla. Tätä työtä varten suoritettavat avoimet haastattelut, joissa asiantuntijat ottivat esille tärkeiksi kokemiaan asioita mainituista aiheista, osoittautuivat tärkeiksi: ne antoivat paljon oleellista tietoa eri näkökulmista. Asiantuntijoiden tehtäväkuvat eroavat toisistaan, mutta jokaisella on vankka kokemus rautatiealalta, joten saatu tieto oli laaja-alaista ja näkemyksellistä. Sen pohjalta työssä pystyttiin luomaan työn tavoitteiden mukainen kuvaus osapuolten palvelutasotavoitteista ja aikataulusuunnittelun prioriteeteista sekä tunnistamaan niiden eroja ja yhtäläisyyksiä. Tämä auttaa lukijaa kytkemään työn seuraavassa vaiheessa kuvatut aikataulun palvelutasotekijät Suomen rautatieliikenteeseen. Haastatteluissa myös nousi esille Suomen rautatieliikenteen kannalta paljon eurooppalaisessa kirjallisuudessaakin tärkeäksi kuvattua rautatieliikenteen palvelutasoon ja aikataulusuunnitteluun liittyvää tietoa.

Myös junan ajoaika, vakioaikataulurakenne ja hyvät vaihtoyhteydet nousivat usein esille aikataulusuunnittelun tärkeinä prioriteetteina. Aikataulutetun odotusajan vähyyttä ei sellaisenaan nostettu esille asiantuntijahaastatteluissa, mutta se liittyy junien ajoaikojen ja matkustajien matka-aikojen optimointiin. Suomen tavarajunaliikenteelle tärkeät prioriteetit, junien lisäämismahdollisuus ja kalustokierto, eivät nousseet yhtä vahvasti esille lähdekirjallisuudessa, jonka painotus toisaalta oli matkustajajunaliikenteessä.

Asiantuntijoiden kysymyslomakkeeseen antamissaan vastauksissa muutama palvelutasotekijä erottui tärkeydessään joukosta: matkustajajunaliikenteelle ne olivat aikataulun häiriösietoisuus, junan ajoaika, vakioaikataulurakenne ja vaihtoyhteydet, tavarajunaliikenteelle puolestaan häiriösietoisuus, junien lisäämismahdollisuus, vakioaikataulurakenne ja kalustokierto. Palvelutasotekijöiden keskinäisessä tärkeysjärjestyksessä oli vastausten kesken eroja, mutta valinnat aikataulujen arviointikehikkoon Analyttisen hierarkiaprosessin (AHP) mukaisia parivertailuja varten olivat riittävän selkeät. Häiriösietoisuus sai puolitoistakertaisen määrän pisteitä toiseksi tärkeimpään palvelutasotekijään (junan ajoaika) nähden. Sen lisäksi

arviointikehikkoon valittiin junan ajoaika, vakioaikataulurakenne, vuoroväli ja junien lisäämismahdollisuus.

Aikataulun palvelutason arviointi edellyttää aikataulujen arviointikehikkoon valittujen palvelutasotekijöiden mittaamisen ja määrittämisen lisäksi niiden painottamista tärkeyden perusteella. Muuten aikataulujen vertailu ja arvottaminen johdonmukaisesti ja loogisesti on mahdotonta: Suomen rautatieliikenteen palvelutasotavoitteiden toteutuminen ei riipu kaikista palvelutasotekijöistä samassa määrin.

Arviointikehikon palvelutasotekijöiden eli kriteerien painoarvot tavoitteen "optimaalinen aikataulu" suhteen muodostettiin AHP:n mukaisilla parivertailuilla. Se edellytti asiantuntijoilta valitsemansa näkökulman ottamista aikataulusuunnitteluun, asioiden yleistämistä ja tiettyjä lähtökohtaisia yksinkertaistuksia. Kunkin vertailuparin välisen lähtökohtaisen tärkeyseron hahmottaminen oli siksikin hyvin subjektiivinen tehtävä, vaikka kriteerit ja tehtävänanto määriteltiin selkeästi. Kaikki tämä vaikutti tulosten hajontaan.

Häiriösietoisuus osoittautui parivertailuissa selkeästi tärkeimmäksi kriteeriksi, jonka merkitys lähtökohtaisesti tärkeimpänä kriteerinä vaikuttaa kiistattomalta. Muiden kriteerien painoarvojen keskiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Kriteerien asettaminen tärkeysjärjestykseen ei ollut perusteltua johdonmukaisuusvaatimuksesta jäämisen ja painoarvojen pienen vaihteluvälin takia, olkoonkin että painoarvojen ja niiden ominaisarvojen tutkimisen perusteella junan ajoaikaa ja junien lisäämismahdollisuutta voisi tutkimuksen puitteissa pitää hieman vakioaikataulurakennetta ja vuoroväliä tärkeämpinä palvelutasotekijöinä.

Tarkasteltaessa vastauksia osapuolittain, kriteerien lopullisten painoarvojen kesken oli enemmän eroa kuin otettaessa keskiarvo kaikista vastauksista: junan ajoaika muodostui häiriösietoisuuden jälkeen tärkeimmäksi kriteeriksi ennen vuoroväliä, junien lisäämismahdollisuutta ja vakioaikataulurakennetta.

Painottaminen ilman häiriösietoisuutta muutti kriteerien painoarvoja ja vastausten johdonmukaisuuksia: vuoroväli osoittautui tärkeimmäksi kriteeriksi. Huomioiden tulosten ristiriitaisuuden häiriösietoisuus mukana tehdyn painotuksen kanssa, kriteerien asettaminen tärkeysjärjestykseen ei ollut järkevää.

Tarkasteltaessa vastauksia osapuolittain ilman häiriösietoisuutta, vuoroväli nousi junan ajoaikaa tärkeämmäksi kriteeriksi; muiden kriteerien järjestys ei muuttunut. Jos 5 kriteerin parivertailut olisivat olleet riittävän johdonmukaisia, kriteerien tärkeysjärjestys ei olisi muuttunut siirryttäessä 4 kriteerin parivertailuun.

Tapaustutkimuksessa tarkasteltiin toista liikenteen heterogeenisuuden määrittämismenetelmistä, joka perustuu aikataulusta suoraan mitattavien junien lähtö- ja saapumisaikavälien käänteislukujen summiin. Sen mittarien arvojen vertaaminen junamäärään, junien lisäämismahdollisuuteen ja junien nopeuseroihin antaa monipuolista tietoa aikataulun palvelutasosta. Menetelmä soveltuu erityisesti saman junamäärän sisältävien, eri aikataulurakenteelle tehtyjen aikataulujen häiriösietoisuuden vertailuun. Toista arviointikehikon palvelutasotekijöille löytynyttä menetelmää (aikataulun säännöllisyys ja rakenne) ei voitu tutkia työn puitteissa.

Tapaustutkimuksessa todennettiin monia kirjallisuusselvityksen perusteella oletettuja palvelutasotekijöiden riippuvuuksia ja tehtiin arvokkaita lisähavaintoja. Liikenteen heterogeenisuuden *SSHR*- ja *SAHR*-mittareilla on yhtä suuri, selkeä riippuvuus junamäärästä. Hajontaa niiden arvoihin syntyy aikataulujen junavälien ja junien nopeuksien eroista. Arvojen kasvu voimistuu junamäärän kasvaessa, joten riippuvuus ei ole lineaarinen. Mittarien keskinäiseen eroon on vaikutusta junien nopeuseroilla ja aikataulun aikavälin alkupäässä mahdollisesti olevilla saapuvilla ja loppupäässä olevilla lähtevillä aikatauluviivoilla.

Liikenteen heterogeenisuuden mittarien arvot paranevat junien lisäämismahdollisuuden kasvaessa. Riippuvuus ei ole yhtä selkeä kuin junamäärän kanssa: junamäärän ohella sekä lähtö- että saapumisaikavälien jakaumat vaikuttavat lisäämismahdollisuuteen. Hajontaa mittarien arvojen ja lisäämismahdollisuuden riippuvuuteen aiheuttavat erot aikataulujen junaväleissä (hukkaan menevä kapasiteetti) sekä junien nopeuksissa ja ryhmittelyssä.

Junamäärän ja junien lisäämismahdollisuuden mittari oli ratakapasiteetin käyttöastetta käyttökelpoisempi mittari tapaustutkimukseen, koska käyttöaste perustuu junavälien summaan eikä yksittäisiin junaväleihin. Lisäksi se kätkee tietoa junien lisäämismahdollisuudesta. Vakioaikataulurakenteilla oli tutkimuksen paras junien lisäämismahdollisuus.

8.2 Päätelmät

Palvelutasotekijöiden tunnistaminen oli palvelutasotekijä-käsitteen määrittämisen jälkeen riittävän yksiselitteistä, samoin niiden ymmärrettävä määrittäminen, kattava kuvaaminen ja kytkeminen teoriasta käytäntöön: laajan ja monipuolisen lähdeaineiston ansiosta lähes kaikista niistä löytyi paljon tietoa.

Erot palvelutasotekijöiden riippuvuussuhteiden määrässä ja moniselitteisyydessä osaltaan vaikuttavat löytyneen tiedon määrään ja laatuun. Lisäksi, osaa palvelutasotekijöistä on perinteisesti pidetty erityisen tärkeinä ja tutkittu enemmän.

Joidenkin määrittämismenetelmien ymmärrettävyyttä ja käyttökelpoisuutta heikentää niiden monimutkaisuus ja matemaattinen haastavuus. Työn teoreettisessa osassa esiteltiin käytännössä kaikki lähdeaineistosta löytyneet, työhön sopivat menetelmät. Menetelmiä löytyi matkustajan häiriösietoisuudelle, vaihtoajalle, liikenteen heterogeenisuudelle, junien lisäämismahdollisuudelle, ratakapasiteetin käyttöasteelle sekä aikataulun rakenteelle ja säännöllisyydelle. Junamäärä, junien ajoaika ja osa sen tekijöistä, junavälit ja junien nopeuserot voidaan mitata suoraan aikataulusta. Puskuriajan mittaaminen edellyttää tietoa opastinväleistä, pelivaran puolestaan tietoa junan teoreettisesta ajoajasta. Pelivaran optimaalista jakamista on tutkittu tarkkaan, minkä pohjalta sille voisi kehittää hyvän mittarin. Vaihtoyhteydet ja kalustokierto otetaan huomioon tietyissä matemaattisesti monimutkaisissa vakioaikataulujen optimointimenetelmissä, mutta työhön sellaisenaan sopivia menetelmiä niiden määrittämiseen aikataulusta ei löytynyt; erityisesti vaihtoyhteyksien mittarin pitäisi huomioida monia eri tekijöitä (esimerkiksi matkaketjujen jakauma), joiden oikeaoppinen painottaminen edellyttää syvällistä tutkimusta.

Sekä mitattaville että määritettävälle palvelutasotekijöille ei löytynyt valmiita yleispäteviä laatuasteikoita raja-arvoineen, mikä tekee aikataulujen vertailusta ja arvottamisesta haastavaa.

Huomion arvoista on, ettei liikenteen homogeenisuus noussut tärkeimpien kriteerien joukkoon kummassakaan Suomen rautatieliikenteen osapuolten palvelutasotavoitteita ja aikataulusuunnittelun prioriteetteja selvittäneissä kyselytutkimuksessa, vaikka sen lisääminen on tehokas tapa parantaa aikataulun häiriösietoisuutta. Tämä viittaa siihen, että muut keinot ajavat eri syiden ja rajoitteiden takia lähtökohtaisesti homogenisoinnin edelle.

AHP:n parivertailujen johdonmukaisuusvaatimuksen täyttyminen edellyttää asiantuntijoilta hyvin huolellista vastaustensa läpikäymistä ja korjaamista, jotta tulosten merkitsevyys olisi riittävä. Jos 5 kriteerin parivertailut olisivat olleet riittävän johdonmukaisia, kriteerien tärkeysjärjestys ei olisi muuttunut siirryttäessä 4 kriteerin parivertailuun. Mainituista ongelmista huolimatta parivertailuilla saatiin riittävän oleellista tietoa tärkeimpien palvelutasotekijöiden lähtökohtaisista merkityksistä aikataulusuunnittelussa; riittävän häiriösietoisuuden varmistaminen on erityisen tärkeää.

Suuri osa aikataulujen nykyisistä optimointimenetelmistä minimoi junien pysähdysaikoja ja matkustajien matka-aikoja, mikä ei ole aikataulun häiriösietoisuuden kannalta hyvä lähtökohta. Aikataulun häiriösietoisuuden arviointi on tärkeää ennen sen käyttöönottoa; monet aikataulujen optimointimenetelmät laskevat sekundaaristen viiveiden odotusarvon junamäärän, junavälien ja jonoteorian perusteella. Tähän peilaten arviointikehikon kriteereiksi valitut palvelutasotekijät ovat loogisia ja häiriösietoisuuden korostuminen ymmärrettävää. Ottaen huomioon, että Liikennevirastolle on tärkeää selvittää aikataulujen kehittämisen mahdollisuuksia nimenomaan liikenteen täsmällisyyden parantamiseksi, häiriösietoisuutta painottava, aikataulun teknisiin palvelutasotekijöihin keskittyvä arviointikehikko vaikuttaa hyvältä lähtökohdalta aikataulujen kehittämiseksi.

Aikataulun häiriösietoisuuden lisääminen edellyttää usein tinkimistä tiettyjen palvelutasotekijöiden laadusta: osan junista ajoaikoja saatetaan joutua pidentämään, jotta junien nopeuserot eivät kasvaisi; vakioaikataulurakenne saattaa etenkin suhteellisen pienillä junamäärillä kasvattaa junavälien hajontaa, jos matkustajien vaihtoajat pidetään mahdollisimman lyhyinä; junamäärän lisääminen ja vuorovälien lyhentäminen huonontavat häiriösietoisuutta ratkaisevasti, kun junamäärä ylittää tietyn rajan. Häiriösietoisuudesta ei pitäisi tinkiä etenkään silloin, kun viiveiden ketjuuntumisen todennäköisyyden kasvu voimistuu liikenteen heterogeenisuuden tai liikennesuorituksen kasvaessa. Vaihtoehtoisiksi jää pitää muiden palvelutasotekijöiden laatu tasavertaisena tai heikentää yhden niistä laatua muiden laadun parantamiseksi.

Kaksi vaihtoehtoista aikataulua voivat saada saman kokonaislaatuarvon kumpaa tahansa edellä mainittua periaatetta noudatetaankaan. Todellisuudessa jokaisen palvelutasotekijän laadun on oltava riittävän hyvällä tasolla, joten kehikossa pitäisi olla tiettyjen periaatteiden perusteella muodostettu kunkin palvelutasotekijän minimilaatuvaatimus. Se estäisi samalla sen, että jonkin palvelutasotekijän laatu voi kohtuuttoman suureksi kasvaessaan nostaa aikataulun palvelutasoa niin voimakkaasti, että jonkin muun palvelutasotekijän heikolla laadulla ei ole merkitystä. Jotta

arviointikehikkoa voitaisiin käyttää kokonaisvaltaisesti aikatauluvaihtoehtojen vertailuun ja arvottamiseen, palvelutasotekijöiden arvoille täytyisi olla olemassa portaikko, jota ilman ei palvelutasotekijöille voida antaa johdonmukaisia laatuarvoja.

Tanskassa selvitettiin vuonna 2011 aikataulun tärkeimpiä kriteereitä tämän työn kyselytutkimukseen vertautuvassa tutkimuksessa (Schittenhelm 2011). Se liittyi väitöstutkimukseen (Schittenhelm 2013), jonka tavoitteena oli kehittää yhteisesti hyväksytty optimaalisen aikataulun kriteeristö mittareineen Tanskan rautatieliikenteen osapuolille. Kuten tässäkin työssä tehtiin, tutkimuksessa osapuolille lähetettiin kyselylomake aikataulusuunnittelun tärkeimpien kriteerien tunnistamiseksi. Tämän jälkeen tarkoituksena oli järjestää osapuolille yhteinen tilaisuus, jossa parivertailulla muodostettaisiin kriteerien keskinäinen tärkeysjärjestys, valittaisiin tämän pohjalta 4–6 tärkeintä kriteeriä arviointikehikkoon ja muodostettaisiin niille painoarvot. Yhteisen tilaisuuden järjestäminen varmistaisi ensinnäkin sen, että kriteerien merkitys aikataulusuunnittelussa ymmärrettäisiin samalla tavalla osapuolten kesken ja toiseksi sen, että jokainen osapuoli antaisi hyväksyntänsä lopulliselle arviointikehikolle.

Tämän työn tekemisen aikana oli tiedossa, että häiriösietoisuus muodostui selkeästi tärkeimmäksi kriteeriksi matkustajajunaliikenteelle: se sai yli tuplasti enemmän pisteitä kuin mikään muu kriteeri. Lähes yhtä tärkeinä pidettiin vakioaikataulurakennetta, hyviä vaihtoyhteyksiä ja junien aikataulutetun odotusajan vähyyttä. Ainoastaan matkustajajunaliikenteen rautatieyritys piti nopeita ja tiheään liikennöityjä suoria junayhteyksiä erityisen tärkeänä. Toisaalta, aikataulutetun odotusajan väheneminen nopeuttaa junan ajoaikaa. Tavarajunayritykselle (DB Schenker Rail Scandinavia) tärkein kriteeri oli yhteen sovitettut kansainväliset aikatauluviivat. Häiriösietoisuus, aikataulutetun odotusajan vähyys ja vakioaikataulurakenne olivat seuraavaksi tärkeimmät. On hyvä huomata, ettei tavarajunille varattujen aikatauluviivojen määrä ollut tärkeimpien kriteerien joukossa.

Suomessa ja Tanskassa saatujen tulosten yhtäläisyydet ja niiden vertaaminen eurooppalaiseen kirjallisuuteen osoittivat, että muutamaa aikataulusuunnittelun prioriteettia pidetään kaikkialla tärkeänä. Aikataulun häiriösietoisuus on selkeä pääprioriteetti, johon päästään eri tavoilla muita palvelutasotekijöitä sääten; viime kädessä maakohtaiset prioriteetit ohjaavat, mitä palvelutasotekijöitä painotetaan pyrittäessä häiriösietoiseen aikatauluun.

SAHR ja *SSHR* ovat käyttökelpoiset mittarit liikenteen heterogeenisuuden määrittämiseen. Niihin perustuvaa arviota aikataulun häiriösietoisuudesta voidaan peilata johdonmukaisesti ja loogisesti aikataulun junaväleihin, junien nopeuseroihin, junamääriin ja junien lisäämismahdollisuuteen. Mittarien käyttö soveltuu erityisesti saman junamäärän sisältävien, mutta eri aikataulurakenteelle tehtyjen aikataulujen vertaamiseen. Niistä on pelkkää häiriösietoisuutta tarkasteltaessa perusteltua valita se, kumman *SSHR*- ja *SAHR*-arvojen painotettu keskiarvo on pienempi. Painotetun keskiarvon sijaan riittää pelkän keskiarvon laskeminen, jos lähtö- ja saapumisaikaväleille annetaan sama painoarvo.

Junamäärä ja junien lisäämismahdollisuus ovat hyvät mittarit aikataulujen vertailuun, kun aikataulujen *SSHR*- ja *SAHR*-arvot tunnetaan. Jos aikataulujen kesken ei arvoissa ole juurikaan eroa, suuremman junamäärän ja lisäämismahdollisuuden sisältävää

aikataulua voidaan yleensä pitää parempana; poikkeuksena tilanteet, joissa pieni muutos arvoissa heikentää aikataulun häiriösietoisuutta ratkaisevasti.

Ainakin kaksi asiaa kuitenkin vaikeuttavat vertailua. Ensinnäkin, junamäärä ja lisäämismahdollisuus eivät usein saa samassa aikataulussa vertailun korkeimpia arvojaan. Toiseksi, usein ei ole järkevää valita heterogeenisuuden mittareiltaan parasta aikataulua, jos sen junamäärä ja lisäämismahdollisuus tai niistä se, kumpaa eniten painotetaan, on selkeästi vertailun pienin. Tämä pätee varsinkin silloin, kun heterogeenisuuden mittarien arvot muuttuvat aikataulun häiriösietoisuuden tavoitetaso kannalta suhteellisen merkityksettömällä arvovälillä. Vertailu on joka tilanteessa mahdollista vain jos *SSHR*- ja *SAHR*-mittareille olisi olemassa laatuasteikot raja-arvoineen eri junamääriille ja junien lisäämismahdollisuuksille.

Osaan tutkimuskysymyksistä ei löytynyt aivan toivottua määrää vastauksia, mutta suurimpaan osaan saatiin hyvinkin kattavasti tietoa. Työn empiirisessä osassa tehtiin uusia, käyttökelpoisia löydöksiä: aikataulun arviointikehikon palvelutasotekijöiden tärkeydestä saatiin lähtökohtaista tietoa, ja tapaustutkimuksessa käytetyt liikenteen heterogeenisuuden mittarit soveltuvat aikatauluvaihtoehtojen palvelutason osittaiseen arviointiin.

8.3 Jatkosuositukset

Jotta työn sisältöä voitaisiin hyödyntää jatkossa toivotussa määrin, esitetään toimenpide- ja tutkimusehdotuksia ratakapasiteetin yhteensovittamisen ja aikataulujen arvioinnin kehittämiseksi. Ne tähtäävät arviointikehikkoon, joka sellaisenaan soveltuisi hyvin ratakapasiteetin yhteensovittamisen ja aikatauluvaihtoehtojen arvioinnin tueksi. Lisäksi liikenteen homogeenisuutta ja aikataulun häiriösietoisuutta lisäävien ratkaisujen huomioiminen tulevaisuuden aikataulusuunnittelussa auttaisi viime kädessä Liikennevirastoa saavuttamaan matkustajakaukoliikenteen tärkeimmät tavoitteensa:

- riittävän tiheät, täsmälliset ja nopeat yhteydet
- optimaaliset junayhteysajoitukset odotus- ja vaihtoaikojen minimoimiseksi
- ratakapasiteetin tehokas käyttö
- rataverkon häiriöiden pieni määrä ja niiden hyvä hallittavuus.

1. Palvelutasotekijöiden suositusarvojen kehittäminen tekijöiden keskinäisten riippuvuuksien perusteella

Etenkin liikenteen heterogeenisuudelle ja junien lisäämismahdollisuudelle olisi hyvä kehittää lähtökohtaisia suositusarvoja, koska niille löytyi hyviä määrittämismenetelmiä. Vähintäänkin suuntaa antavien riippuvuuskuvaajien kehittämisen mahdollisuutta voisi tutkia niille palvelutasotekijöille, joille löytyi ainoastaan kuvailevia suosituksia. Tämä auttaisi suositusarvojen kehittämisessä. Löydetyn tiedon pohjalta kaikille palvelutasotekijöille voidaan silti jo nykyisellään vähintäänkin vetää aikataulusuunnittelua ohjaavia suuntaviivoja.

2. Yhteisesti hyväksytyn arviointikehikon muodostaminen

Seuraava looginen askel olisi osapuolten kokoontuminen. Sen yhteydessä voitaisiin tämän työn tuloksia hyödyntäen muodostaa yhteisesti hyväksytty kriteeristö

painoarvoineen, jotta tiedettäisiin mille palvelutasotekijöille on syytä kehittää mittaristo ja laatuarvoportaikko (jatkosuositus 5.). Ilman niitä ei arviointikehikkoa voida käyttää kokonaisvaltaisesti.

Samalla olisi hyvä sopia aikataulujen arvottamiseen ja vertailuun parhaiten soveltuvasta menettelystä; aikatauluja voi olla järkevää joko a) vertailla ja arvottaa AHP:n mukaisella parivertailulla, b) arvottaa muodostamalla niille erikseen palvelutasotekijöiden laatuarvot, joiden perusteella vertailukin on mahdollista tai c) tilanteesta riippuen arvioida a- ja b-vaihtoehtoista paremmin soveltuvalla.

Lopputuloksena aikataulujen laadun määrittäminen ja aikataulujen vertailu olisi objektiivista, perustuen yhteisesti hyväksyttyihin periaatteisiin. On kuitenkin muistettava, että viime kädessä AHP on päätöksenteon apuväline, eikä lopullisen päätöksen pitäisi yksinomaan perustua sillä saatuihin tuloksiin.

3. Matkustajien palvelutasotekijöiden määrittämismenetelmien kehittäminen

Tapaustutkimuksessa käytetyt liikenteen heterogeenisuuden mittarit soveltuvat aikatauluvaihtoehtojen teknisen laadun arviointiin, huomioden tärkeimmät tekniset palvelutasotekijät pelivaraa lukuun ottamatta. Ne eivät kuitenkaan perustu matkustajille tärkeiden palvelutasotekijöiden, kuten junien ajoaikojen, vuorovälien ja vaihtoyhteyksien, suoraan tarkasteluun. Teknisten ja matkustajien palvelutasotekijöiden yhteinen tarkastelu on tärkeää siksi, että kokonaisvaltaisesti hyvässä aikataulussa pitää niiden välillä olla riittävä tasapaino. Tämän takia esimerkiksi ratakapasiteetin käyttöastetta pienentävää, mutta matkustajien palvelutasolle huonoa junien ryhmittelyä, jossa samantyyppisiä matkustajajunia asetetaan kulkemaan peräkkäin lyhyin vuorovälein ennen pidempää taukoa, ei voida noudattaa voimakkaasti.

Jatkossa olisi edellä mainittujen asioiden takia hyvä kehittää ja tutkia riittävän johdonmukaisia ja yksiselitteisiä matkustajien palvelutasotekijöiden laadun mittareita ja määrittämismenetelmiä. Sopivia toimenpiteitä ovat:

- henkilöautomatkojen nopeuksiin perustuvan junien ajoaikojen mittarin kehittäminen
- vaihtoyhteyksien laadun määrittämismenetelmän ja sen mittarin kehittäminen
- olemassa olevan aikataulun säännöllisyyden ja rakenteen määrittämisen menetelmän käytettävyyden ja soveltuvuuden arviointi
- tutkia, sisältääkö edellä mainittu menetelmä vuorovälien riittävän kattavan tarkastelun, vai pitääkö sille kehittää oma mittari

4. Junavälien painottaminen niiden tärkeyden perusteella liikenteen heterogeenisuuden mittareissa

Liikenteen heterogeenisuuden mittarien rinnalla on lisäksi järkevää tarkastella aikataulun kriittisimpiä junia ja junavälejä, painottaen niitä kokonaisuudessa niiden tärkeyksien perusteella. Tämä estää sen, ettei aikataulun kokonaislaatu muodostu liian korkeaksi niiden kustannuksella tai päinvastoin. Jollain rataosalla pieni muutos mittarien arvoissa johtaa suurempaan viiveiden vähenemiseen kuin suuri muutos toisella rataosalla. Tämän takia on tärkeä tutkia, johtuuko muutos esimerkiksi jo valmiiksi lyhyen kriittisen junavälin lyhenemisestä, monen ylimitoitettun junavälin lyhenemisestä

tai junien nopeuserojen kasvusta. Samalla on tärkeää tarkastella, missä suhteessa toisiinsa nähden mittarien arvot muuttuvat. Ne ovat aina samat, kun junien välillä ei ole nopeuseroja ja kaikki tarkasteltavan aikavälin junat sekä lähtevät että saapuvat aikavälin sisällä.

5. Laatuasteikkojen ja raja-arvojen kehittäminen kaikille arviointikehikon mitattaville ja määritettävälle palvelutasotekijöille

Jokaisen palvelutasotekijän laadun on oltava riittävän hyvä. Siksi jatkossa olisi tärkeä muodostaa periaatteet, joilla voidaan määrittää kunkin palvelutasotekijän minimilaatuvaatimus. Se estäisi samalla sen, ettei jonkin palvelutasotekijän laatu voi kohtuuttoman suureksi kasvaessaan nostaa aikataulun kokonaislaatua niin voimakkaasti, että jonkin muun palvelutasotekijän heikolla laadulla ei olisi merkitystä.

Jotta arviointikehikkoa voitaisiin käyttää kokonaisvaltaisesti aikatauluvaihtoehtojen vertailuun ja arvottamiseen johdonmukaisiin laatuarvoihin perustuen, sekä mitattaville että määritettävälle palvelutasotekijöille on jatkossa tärkeää määrittää yleispätevät mittarien laatuasteikot raja-arvoineen. Tätä varten pitäisi vielä tutkia

- voidaanko liikenteen heterogeenisuuden mittareille *SSHR* ja *SAHR* luoda laatuasteikot raja-arvoineen eri junamäärille ja junien lisäämismahdollisuuksille
- aikataulun säännöllisyyden ja rakenteen määrittämisen menetelmän (luku 3.10.2) käytettävyyttä ja soveltuvuutta aikataulujen arviointiin ja vertailuun
- sisältääkö edellä mainittu menetelmä vuorovälien riittävän kattavan tarkastelun, vai pitääkö sille kehittää laatuasteikot ja raja-arvot sisältävä mittari
- millainen mittari soveltuisi junien ajoaikojen arviointiin, ja voidaanko sille luoda laatuasteikot ajoaikojen raja-arvoineen; mittari voisi esimerkiksi perustua lähtökohtaan, että joukkoliikenteen runkomatkalla matka-ajan tulee pääosin olla henkilöautolla tehdyn matkan kestoa lyhyempi.

LÄHTEET

- Andersson, E., Peterson, A., Krasemann, J. T. 2011. Robustness in Swedish Railway Traffic Timetables. Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Rome. 16.–18.2.2011. 18 s.
- Aronson, M., Ekman, J., Kreuger, P. 2003. Coordination of planning processes for traffic operators on rail networks. Technical Report T2003:13. Banverket. 51 s.
- Bosserhoff, D. 2007. Making Regional Railroads More Attractive – Research Studies in Germany and Patronage Characteristics. Journal of Public Transportation. Vol. 10, No. 1.
- Carey, M., 1998. Optimizing scheduled times, allowing for behavioural response. Transportation Research Part B 32. S. 329–342.
- Carey, M. 1999. Ex ante heuristic measures of schedule reliability. Transportation Research Part B 33. S. 473–494.
- Carey, M., Carville, S. 2000. Testing schedule performance and reliability for train stations. Journal of the Operational Research Society Vol. 51, No 6. S. 666–682.
- Carey, M., Kroon, L., Wendler, E., Hansen, I. 2005. Heuristics, analysis or simulation – which approach leads to best result? Forum discussion. 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft. 9.6.2005
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P. 2011. Defining Robustness of a Railway Timetable. Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Rome. 16.–18.2.2011. 20 s.
- Ferreira, L., Higgins, A. 1996. Modelling reliability of train arrival times. Journal of Transportation Engineering, Vol. 122. S. 414–420.
- Gibson, S., Cooper, G., Ball, B. 2002. Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network. Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 36, Part 2. S. 341–354.
- Goverde, R. 1998. Synchronization Control of Scheduled Train Services to Minimize Passenger Waiting Times. The Netherlands TRAIL Research School. Delft. 35 s.
- Goverde, R., Hooghiemstra, G., Lopuhaä, H. 2001. Statistical Analysis of Train Traffic. TRAIL Studies in Transportation Science S2001/1. The Netherlands TRAIL Research School. 139 s.
- Goverde, R. 2005. Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis. Trail Thesis Series no.T2005/10. The Netherlands TRAIL Research School. 293 s.
- Hansen, I. 2001. Improving railway punctuality by automatic piloting. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings. S. 792–797.

Hansen, I., Pachl, J. 2008. Conclusions. Teoksessa Albrecht, T., Brünger, O., Dahlhaus, E., Goverde, R., Hansen, I., Huisman, D., Jacobs, J., Kroon, L., Maróti, G., Martin, U., Pachl, J., Radtke, A., Siefert, T., Wendler, E., Yuan, J. 2008. Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling, Simulation. Eurailpress/ DVV Rail Media. Hamburg. 228 s. S. 209–211.

Hansen, I. 2010. Railway Network Timetabling and Dynamic Traffic Management. International Journal of Civil Engineering. Vol. 8, No 1. 14 s.

Hofman, M., Madsen L. 2005. Robustness in train scheduling. Project number 72. Danmarks Tekniske Universitet. Lyngby. 156 s.

Huisman, D., Boucherie, R. 2001. Running Times on Railway Sections with Heterogeneous Train Traffic. Transportation Research B. Vol. 35. S. 271–292.

Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R., Vromans, M. 2005. Operations Research in Passenger Railway Transportation. Econometric Institute Report EI2005-16. 33 s.

Höllmüller, J., Klahn, V. 2005. Implementation of the UIC 406 Capacity Calculation at Austrian Railways (ÖBB). Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft. 8.–10.6.2005.

Iikkanen, P., Siren, J. 2005. Rautatiekuljetusten kilpailukyky Suomessa. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 44/2005. Liikenne- ja viestintäministeriö. Helsinki. 64 s.

Kaas, A. 1998. Fokus på tiltag, som kan fremme jernbanesystemernes kapacitet. Nordisk Järnbane Tidsskrift. 5/1998. NJS. København. S. 16–17.

Kandels, C., Gröger, T. 2005. Declaration of Congested Infrastructure in the Network Statement of the Infrastructure Manager Deutsche Bahn. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft. 8. 10.6.2005.

Kerosuo, M. 2002. Rautateiden tavoitteellinen palvelutaso tulevaisuudessa. Seminaaritiivistelmä. Väylät ja Liikenne 2002. Jyväskylä. 9.–10.10.2002.

Kroon, L., Dekker, R., Vromans, M. 2005. Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach. RSM Erasmus University, Rotterdam. 26 s.

Landex, A., Kaas, A., Hansen, S. 2006. Railway Operation. Report 2006 - 4. Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark. Copenhagen. 155 s.

Landex A., Kaas A. H., Schittenhelm B., Schneider-Tilli J. 2006b. Evaluation of railway capacity. Annual Transport Conference at Aalborg University 2006. Aalborg. 22 s.

Landex, A. 2008. Methods to estimate railway capacity and passenger delays. Department of Transport, Technical University of Denmark. Report 5 2008. DTU Transport. Lyngby. 202 s.

Landex, A. 2009. The Potential for Regional Express Trains when Introducing High speed Operation. Trafikdage på Aalborg Universitet 2009. Aalborg. 12 s.

Liikennevirasto 2010. Verkkoselostus 2012. Liikenneviraston väylätietoja 03 2010. Liikennevirasto. Helsinki. 138 s.

Liikennevirasto 2010b. Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 08 2010. Liikennevirasto. Helsinki. 48 s.

Liikennevirasto 2010c. Talvi 2009–2010 Suomen rautateillä – tapahtumat ja johtopäätökset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15 2010. Liikennevirasto. Helsinki. 55 s.

Liikennevirasto 2010d. Ohje joukkoliikenteen palvelutason määrittelyyn. Liikenneviraston ohjeita 07 2010. Liikennevirasto. Helsinki. 25 s.

Luethi, M., Weidemann, U., Nash, A. 2007. Passenger Arrival Rates at Public Transport Stations. Proceedings of the Transport Research Board 86th Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington.

Mattsson, L-G. 2004. Train service reliability: A survey of methods for deriving relationships for train delays. Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure Unit for Transport and Location Analysis. Tukholma. 30 s.

Meng, L., Goverde, R., Li, H. 2011. The Impact of Capacity Utilization on Railway Timetable Reliability. Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Rome. 16.–18.2.2011. 16 s.

Musto, M. 2008. Rautatieliikenteen simuloinnin merkitys ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisessa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2008. Ratahallintokeskus. Helsinki. 124 s.

Mäkitalo, M. 2001. Vakioaikataulu junaliikenteen ja rautatieinfrastruktuurin kehittämisessä. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2001. Ratahallintokeskus. Helsinki. 117 s.

Mäkitalo, M. 2007. Markkinoilletulo ja rautatiemarkkinoiden muutos kotimaisen tavaraliikenteen avautuessa kilpailulle Suomessa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2007. Ratahallintokeskus. Helsinki. 180 s.

Nervola, A. 2009. Rautatieliikenteen täsmällisyyden kehittäminen suorituskannustusjärjestelmällä. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 19/2009. Ratahallintokeskus. Helsinki. 112 s.

Nyström B. 2008. Aspects of Improving Punctuality from Data to Decision in Railway Maintenance. Doctoral Thesis 2008:11. Luleå University of Technology. Luleå. 276 s.

Olsson, N., Haugland, H. 2004. Influencing factors on train punctuality – results from some Norwegian studies. *Transport Policy*. Vol. 11. Issue 4. S. 387–397.

Paavilainen, J., Salkonen, R., Rantala, T. 2011. Rautatieliikenteen täsmällisyyteen liittyvät tietotarpeet. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 12/2011. Liikennevirasto. Helsinki. 67 s.

Pachl, J. 2002. *Railway Operation and Control*. VTD Rail Publishing. USA. 267 s.

Pachl, J. 2008. *Timetable Design Principles*. Teoksessa Albrecht, T., Brünger, O., Dahlhaus, E., Goverde, R., Hansen, I., Huisman, D., Jacobs, J., Kroon, L., Maróti, G., Martin, U., Pachl, J., Radtke, A., Siefer, T., Wendler, E., Yuan, J. 2008. *Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling, Simulation*. Eurailpress/ DVV Rail Media. Hamburg. 228 s. S. 9–42.

Peeters, L. 2003. *Cyclic Railway Timetable Optimization*. TRAIL Thesis series T2003/5. The Netherlands TRAIL Research School, Erasmus University Rotterdam. 190 s.

Pesonen, H., Moilanen, P. 2006. Joukkoliikenteen palvelutasotekijöiden arvottaminen. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 36/2006. Liikenne- ja viestintäministeriö. Helsinki. 66 s.

Pitkänen, J.-P. 2006. Radan välityskyvyn mittaamisen ja mittarien kehittäminen. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2006. Ratahallintokeskus. 145 s..

RHK 2004. Ratainvestointien hankearviointiohje. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 12. Ratahallintokeskus. Helsinki. 60 s.

RHK 2006. Rautatieliikenne 2030 Radanpidon pitkän aikavälin suunnitelma. Strategioita ja selvityksiä 2/2006. Ratahallintokeskus. Helsinki. 62 s.

RHK 2007. Opas aikataulusuunnitteluun. Ratahallintokeskus. Helsinki. 23 s.

RHK 2009. Tulevaisuuden henkilöliikenneselvitys. Strategioita ja selvityksiä 1/2009. Ratahallintokeskus. Helsinki. 87 s.

Rietveld P., Bruinsma F., van Vuuren D. 2001. Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 35, Issue 6. S. 539–559.

Saaty, T. 1990. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 48. S. 9–26.

Salkonen R., Paavilainen J., Mäkelä T. 2009. Rautatieliikenteen täsmällisyystutkimuksen kirjallisuuskatsaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2009. Ratahallintokeskus. Helsinki. 272 s.

- Salkonen, R. 2008. Rautatieliikenteen täsmällisyyden mittaaminen. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 15/2008. Ratahallintokeskus. Helsinki. 114 s.
- Salkonen, R., Mäkelä, T. 2010. Rautatieliikenteen täsmällisyyden mittaamisen ja seurannan käytännöt eri maissa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 42 2010. Liikennevirasto. Helsinki. 76 s.
- Sameni, M., Landex., A., Preston, J. Developing the UIC 405 Method for Capacity Analysis. Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Rome. 16.–18.2.2011. 19 s.
- Schittenhelm, B. 2008. Identification of Timetable Attractiveness Parameters by an International Literature Review. Trafikdage på Aalborg Universitetet 2008. Aalborg. 11 s.
- Schittenhelm, B. 2011. Creation of a Framework for Railway Timetable Optimization Criteria. Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Rome. 16.–18.2.2011. 19 s.
- Schittenhelm, B. 2013. Quantitative Methods for Assessment of Railway Timetables. Department of Transport, Technical University of Denmark. PhD thesis. DTU Transport. Lyngby. 276 s.
- Sipilä, A. 2008. Rautatieliikenteen häiriöiden analysoinnin kehittäminen. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 11/2008. Ratahallintokeskus. Helsinki. 107 s.
- Skagestad, R. 2004. Kritiske prestasjonsindikatorer i jernbanedrift. Norwegian University of Science and Technology. Oslo. 84 s.
- Triantaphyllou, E., Mann, S. 1995. Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice. Vol 2. No. 1. S. 35–44.
- Tzieropoulos, P., Emery, D. 2009. How regular is a regular-interval timetable? Theoretical foundations and assessment methodology. 9th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità/Ascona. 9.–11.2009. 12 s.
- UIC 2000. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping – Recovery margins. Leaflet 451-1. International Union of Railways. 17 s.
- UIC 2004. Capacity. Code 406. International Union of Railways. 22 s.
- UIC 2007. Exchange of data concerning the running of international passenger and freight trains between Infrastructure Managers for purpose of quality analysis. Leaflet 450-2. International Union of Railways. 23 s.
- Vromans, M., Dekker, R., Kroon, L. 2004. Reliability and heterogeneity of railway services. European Journal of Operational Research. Vol. 172 (2006). S. 647–665.

Vromans, M. 2005. Reliability of Railway Systems. TRAIL Thesis series T2005/7. The Netherlands TRAIL School. Erasmus University Rotterdam. 244 s.

Wahlborg, M. 2005. Application of the UIC 406 capacity leaflet at Banverket. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft. 8.–10.6.2005.

Wardman, M., Shires, J., Lythgoe, W., Tyler, J. 2004. Consumer Benefits and Demand Impacts of Regular Train Timetables. International Journal of Transport Management, Vol. 2. S. 27–37.

Yuan J., Hansen I. 2007. Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. Transportation Research Part B. Vol. 41. S. 202–217.

Haastattelut

Helander, R. 2011. Liikennepäällikkö. Liikennevirasto, Rataliikennekeskus. Helsinki. 6.5.2011.

Hovi, S. 2011. Liikennesuunnittelija. VR Group Oy. Helsinki. 6.5.2011.

Iikkanen, P. 2011. DI. Ramboll Finland, Liikenne. Espoo. 24.5.2011.

Kosonen, T. 2011. Kuljetuspäällikkö. VR Track Oy. Helsinki. 17.5.2011

Lehmuskoski, V. 2011. Joukkoliikennesuunnitteluosaston johtaja. HSL. Helsinki. 2.5.2011.

Mannerström, H. 2011. Henkilöliikenteen suunnittelupäällikkö. VR Group Oy. Helsinki. 11.5.2011.

Nurkka, M. 2011. DI. Maija Nurkka. Liikennevirasto. Helsinki. 18.8.2011.

Oksanen, J. 2011. Lähiliikenteen pääsuunnittelija. VR Group Oy. Helsinki. 4.5.2011.

Pekonen, H. 2011. Kuljetuspäällikkö. VR Group Oy. Helsinki. 26.4.2011.

Pitkänen, J-P. 2011. DI. Ramboll Finland, Liikenne. Espoo. 15.2.2011.

Matka-ajan osatekijöiden suomalaisia arvoja ja suositetut sanktiot myöhästymisille junatyypeittäin

MATKA-AJAN TEKIJÄ	Ojala ja Pursula (1994)	RHK (2004)	Tiehallinto (2005)	Pesonen ja Moilanen (2006)	Nervola (2009)
Matka-aika (matkustaja)		7,1 €/h	8 €/h		
Odotusaika vs. ajoaika (matkustaja)	1,7–3,7 x			1,5 x	
Vaihtoaika vs. ajoaika (matkustaja)	2,0–3,5 x				
Sanktio myöhästymiselle, kaukojuna					32 €/min
Sanktio myöhästymiselle, lähijuna					50 €/min
Sanktio myöhästymiselle, tavarajuna					3,5 €/min

LÄHTEET

Ojala, J., Pursula, M. 1994. Taajamien joukkoliikenteen suunnittelu ja hoito. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka. Opetusmoniste 13. Suomen Paikallisliikenneliitto ry. 238 s..

Tiehallinto 2005. Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvot 2005. Tiehallinto. Helsinki. 20 s.

Matka-ajan osatekijöiden eurooppalaisia arvoja

MATKA-AJAN TEKIJÄ	Rietveld et al. (2001)	Ruotsalaisia arvoja vuodelta 2002 (Pesonen ja Moilanen 2006)	Sveitsiläinen tutkimus, julk. 2002 (Pesonen ja Moilanen 2006)	Norjalainen tutkimus, julk. 2003 (Pesonen ja Moilanen 2006)	Ranskalaisia arvoja vuodelta 2003 (Pesonen ja Moilanen 2006)	Jernbaneverket, Norja (Pesonen ja Moilanen 2006)
Matka-aika ruuhka-aikana vs. matka-aika (matkustaja)					1,5 x	
Matka-ajan lyheneminen (matkustaja)	0,13 €/min					
Ajoaika (yhteiskuntataloudellinen)		36 SEK/h				
Ajoaika (matkustajien työmatkat)		135 (lyhyet)– 172 (pitkät) SEK/h				
Ajoajan lyheneminen (matkustaja)			17,1 CHF/h	15–20 NOK/min		
Odotusaika (työmatkat)		72 (pieni vuorotiheys)– 120 (suuri vuorotiheys) SEK/h				
Odotusaika <12 min (yhteiskuntataloudellinen)		108 SEK/h				
Odotusaika >12 min (yhteiskuntataloudellinen)		36 SEK/h				
Odotusajan lyheneminen (matkustaja)			4,1 CHF/h			
Odotusaika vs. matka-aika (matkustaja)					2 x	0,2 (pitkät matkat)– 1,8 (lyhyet matkat) x
Vaihtoaika (yhteiskuntataloudellinen)		72 SEK/h				
Vaihtoaika (matkustajien työmatkat)		265 (lyhyet)– 337 (pitkät) SEK/h				
Vaihtoajan lyheneminen (matkustaja)			8,4 CHF/h			
Vaihto (matkustaja)						7,2–22,2 NOK
5 min vaihdon haittakustannus				7,7–10,9 NOK		
10 min vaihdon haittakustannus				12,2–18,9 NOK		

Myöhästymisen eurooppalaisia arvoja

MYÖHÄSTYMSLUOKKA	Eurooppalainen keskiarvo (Nellthorp et al. 2001)	Rietveld et al. (2001)	Ruotsalaisia arvoja vuodelta 2002 (LVM 2006)	Sveitsiläinen tutkimus, julkaistu 2002 (LVM 2006, Nyström 2008)	Norjalainen tutkimus, julkaistu 2003 (LVM 2006)	Törnqvist (2006)	Jernbaneverket, Norja (LVM 2006)	Banverket, Ruotsi (Nyström 2008)
Myöhästymisen (matkustajien työmatkat)			265 (lyhyet)– 277 (pitkät) SEK/h					
Myöhästymisen vs. matka-aika (matkustaja)	1,5 x			1,5 x			1,5 (pitkät matkat)– 3 (lyhyet matkat) x	2 x
Odottamaton vs. odotettu myöhästymisen (min)				1,5 x				
Myöhästymisten määrä 20 % -> 10 %					2–4,3 NOK/ matka			
2 min myöhästymisen todennäköisyys 50 % -> 0 %		0,32 €/min						
Epävarmuusminuutti vs. myöhästymisminuutti		2,4 x						
Myöhästymisen, suurnopeusjuna						19,4 €/min		
Myöhästymisen, Intercity-juna						8,2 €/min		
Myöhästymisen, lähijuna						7,8 €/min		
Myöhästymisen, nopea tavarajuna						3,3 €/min		
Myöhästymisen, hidas tavarajuna						3,5 €/min		
Myöhästymisen, veturi						4,4 €/min		

LÄHTEET

Nellthorp, J., Sansom, T., Bickel, P., Doll, C., Lindberg, G. 2001. Valuation conventions for UNITE. Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency. 35 s.

Törnquist J. 2006. Railway traffic disturbance management. Doctoral Dissertation Series No. 2006:03. Blekinge Institute of Technology, Department of Software Engineering. Karlskrona. 206 s.

Asiantuntijoille lähetetty aikataulusuunnittelun prioriteettikysely

Rautatieliikenteen aikataulusuunnittelusta tekee osaltaan haastavaa eri osapuolten osittain ristiriitaiset tavoitteet aikataulun rakenteelle. Lisäksi, suunnittelu vaikeutuu sitä mukaa, kun sille asetettavien reunaehtojen määrä kasvaa: yhteen tavoitetasoon pääseminen edellyttää usein tinkimistä toisesta tavoitetasosta, mutta saattaa samalla parantaa jotain toistakin tavoitetasoa.

Olen kirjallisuustutkimuksen perusteella tunnistanut tärkeimpiä aikataulusuunnittelun prioriteetteja, joiden tärkeyden eri osapuolet saattavat kokea eri tavalla. Pyydän sinua valitsemaan seuraavista vaihtoehtoista 5 tärkeysjärjestyksessä, ja lähettämään lomakkeen minulle täytettynä. Perustelut valintoihisi käsittelemme haastattelussa, mutta voit halutessasi perustella niitä tässäkin vaiheessa vapaamuotoisesti. Vastaan mielelläni mahdollisiin kysymyksiisi, jos haluat esittää niitä ennen vastaamistasi.

- A. **Aikataulun häiriösietoisuus**, jonka ollessa hyvä on liikenne täsmällistä ja pystyy palautumaan nopeasti normaalitilaan viiveiden jälkeen.
- B. **Junaliikenteen homogeenisuus**: homogeenisessa liikenteessä junien nopeuserot ovat pieniä, mikä mahdollistaa heterogeenisempaan liikenteeseen verrattuna saman liikennesuorituksen keskimäärin suuremmilla junaväleillä. Tämä parantaa aikataulun häiriösietoisuutta ja junien täsmällisyyttä.
- C. Paljon **suoria linjoja** ilman tarvetta vaihtaa junaa: matkustaja pystyy tekemään koko matkansa ilman vaihtoa junasta toiseen.
- D. Hyvät **vaihtoyhteydet** matkustajalle: matkustajalla on vaihtoehtona valita kaikkien niiden linjojen väliltä, jotka pysähtyvät matkustajan määränpääasemalla.
- E. **Matka-aika** eli junan ajoaika ja vaihto aika niillä matkoilla, jotka edellyttävät junavaihtoa. Tavaraliikenteelle **junan ajoaika**.
- F. **Junien lisäämismahdollisuus**: jos aikataulu on joustava tai tietyllä tavalla suunniteltu, siihen voidaan tarvittaessa lisätä junia ilman koko aikataulurakenteen muuttamista.
- G. **Ratakapasiteetin tehokas hyödyntäminen**: tällöin liikennesuorite on korkea.
- H. **Vakioaikataulurakenne**: vakioaikataulussa junat lähtevät ja saapuvat säännöllisin vuorovälein tietyllä vakiona pysyvällä minuuttivälillä. Siinä samanlaisen junan eri kulkusuunnat ovat toistensa peilikuvia.
- I. **Junien tiheys** aikataulussa: junatiheyden kasvattaminen nostaa liikennesuoritetta.
- J. **Junalinjan vuoroväli**: mitä pienempi vuoroväli, sitä useammin junalinjalla on lähtöjä.
- K. **Kalustokierto**: Pieni kalustomäärä ja sen korkea kierto lisää riippuvuuksia aikataulun junien kesken, koska sama kalustoyksikkö joutuu tällöin liikennöimään useammilla linjoilla. Kalustomäärän kasvattaminen ja kalustokierron vähentäminen nostaa kalustokustannuksia ja varaa enemmän ratakapasiteettia asemilla.
- L. **Jokin muu/muut?** Esimerkiksi enemmistön tarpeiden/kaupallisten lähtökohtien tyydyttäminen.

Asiantuntijoille lähetetty AHP:n mukainen parivertailukysely

Tehtävä

Vertaile alla kuvatun tavoitteen täyttymisen kannalta kaikkia annettuja kriteereitä pareittain toisiinsa niiden keskinäisen tärkeyden perusteella. Täytettävä vertailutaulukko ja ohjeet löytyvät sivuilta 2–3.

Tavoite

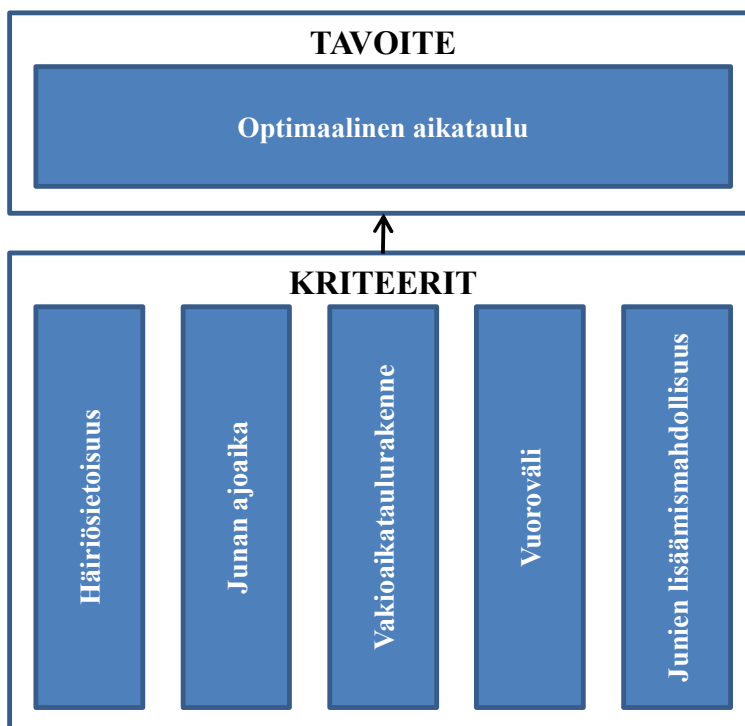
Optimaalinen aikataulu

Optimaalisen aikataulun määritelmä

Optimaalinen aikataulu on koko junaliikenteelle – ei erikseen matkustaja- ja tavarajunanäkökulmasta katsottuna – paras toteutettavissa oleva vaihtoehto. Aikataulun optimaalisuus on subjektiivinen käsite.

Kriteerit

- A. Aikataulun häiriösietoisuus
- B. Junan ajoaika
- C. Vakioaikataulurakenne
- D. Junalinjojen vuorovälit
- E. Junien lisäämismahdollisuus



Kuva A.1. Tavoite ja kriteerit.

Kriteerien kuvaus ja merkitys

- A. **Aikataulun häiriösietoisuuden** ollessa hyvä, on liikenne täsmällistä ja pystyy palautumaan nopeasti normaalitilaan viiveiden jälkeen. Häiriösietoisuuden kasvu parantaa aikataulun laatua.
- B. **Junan ajoajan** lyheneminen lyhentää lähtökohtaisesti myös matkustajien matka-aikaa ja tavarakuljetusten kestoja. Junan ajoajan lyheneminen on aikataulun laadulle lähtökohtaisesti hyvä asia.
- C. **Vakioaikataulurakenteessa** vakioaikataulussa junat lähtevät ja saapuvat säännöllisin vuorovälein tietyllä vakiona pysyvällä minuuttivälillä. Siinä samanlaisen junan eri kulkusuunnat ovat toistensa peilikuvia. Mitä säännönmukaisemmin aikataulu toteuttaa vakioaikataulurakennetta, sitä parempi se on tässä katsannossa aikataulun laadulle.
- D. **Junalinjan vuoroväli:** mitä pienempi vuoroväli, sitä useammin junalinjalla on lähtöjä. Tässä katsannossa aikataulun laatu paranee, kun junalinjojen vuorovälit pienenevät.
- E. **Junien lisäämismahdollisuus:** jos aikataulu on joustava tai tietyllä tavalla suunniteltu, siihen voidaan tarvittaessa lisätä junia ilman koko aikataulurakenteen muuttamista. Aikataulun laadulle on parempi, mitä enemmän aikataulussa on mahdollisuuksia junien lisäämiselle.

Ohje

Täytäkö ystävällisesti parivertailutaulukon (taulukko A.2) alla olevan ohjeen mukaisesti. Taulukko kuvaa parivertailun sanallisten arvioiden ja lukuarvojen vastaavuutta.

1. Mieti parivertailutaulukon kullakin rivillä olevien kriteerien keskinäistä tärkeyttä, kun tavoitteena on luoda optimaalinen aikataulu
2. Katso taulukosta A.1, mikä annetuista sanallisista arvioista vastaa parhaiten kunkin parivertailun kriteerien keskinäistä tärkeyttä
3. Katso taulukosta A.1 sanallista arvioita vastaava lukuarvo
4. Merkitse rasti ruutuun valitsemasi lukuarvon kohdalle ja sitä vastaavan kriteerin puolelle. Jos kriteerit ovat yhtä tärkeitä, rasti tulee ruutuun 1 keskelle riviä.

Taulukko A.1. Parivertailuissa käytettävien sanallisten arvioiden ja lukuarvojen vastaavuus

Sanallinen arvio	Lukuarvo
Kriteeri 1 on yhtä tärkeä kuin Kriteeri 2	1
yhtä tärkeän ja hieman tärkeämmän väliltä	2
Kriteeri 1 on hieman tärkeämpi kuin Kriteeri 2	3
hieman tärkeämmän ja selkeästi tärkeämmän väliltä	4
Kriteeri 1 on selkeästi tärkeämpi kuin Kriteeri 2	5
selkeästi tärkeämmän ja paljon tärkeämmän väliltä	6
Kriteeri 1 on paljon tärkeämpi kuin Kriteeri 2	7
paljon tärkeämmän ja erittäin paljon tärkeämmän väliltä	8
Kriteeri 1 on erittäin paljon tärkeämpi kuin Kriteeri 2	9

Taulukko A.2. Parivertailutaulukko

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
HÄIRIÖSIETOISUUS																		JUNAN AJOAICA
HÄIRIÖSIETOISUUS																		VAKIOAIKATAULURAKENNE
HÄIRIÖSIETOISUUS																		VUOROVÄLI
HÄIRIÖSIETOISUUS																		JUNIEN LISÄÄMISMAHDOLLISUUS
JUNAN AJOAICA																		VAKIOAIKATAULURAKENNE
JUNAN AJOAICA																		VUOROVÄLI
JUNAN AJOAICA																		JUNIEN LISÄÄMISMAHDOLLISUUS
VAKIOAIKATAULURAKENNE																		VUOROVÄLI
VAKIOAIKATAULURAKENNE																		JUNIEN LISÄÄMISMAHDOLLISUUS
VUOROVÄLI																		JUNIEN LISÄÄMISMAHDOLLISUUS

Asiantuntijoiden vastaukset parivertailukyselyyn

Liikennevirasto						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	8.00	6.00	7.00	4.00	0.52
Junan ajoaika	0.13	1.00	0.14	0.14	0.11	0.03
Vakioaikataulurakenne	0.17	7.00	1.00	1.00	0.33	0.11
Vuoroväli	0.14	7.00	1.00	1.00	0.20	0.10
Junien lisäämismahdollisuus	0.25	9.00	3.00	5.00	1.00	0.25

VR1						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	5.00	6.00	6.00	9.00	0.54
Junan ajoaika	0.20	1.00	0.14	0.20	4.00	0.08
Vakioaikataulurakenne	0.17	7.00	1.00	1.00	5.00	0.18
Vuoroväli	0.17	5.00	1.00	1.00	6.00	0.17
Junien lisäämismahdollisuus	0.11	0.25	0.20	0.17	1.00	0.03

VR2						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	9.00	9.00	4.00	9.00	0.55
Junan ajoaika	0.11	1.00	0.20	0.14	1.00	0.04
Vakioaikataulurakenne	0.11	5.00	1.00	0.20	5.00	0.13
Vuoroväli	0.25	7.00	5.00	1.00	5.00	0.24
Junien lisäämismahdollisuus	0.11	1.00	0.20	0.20	1.00	0.04

VR3						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	3.00	4.00	5.00	2.00	0.39
Junan ajoaika	0.33	1.00	2.00	3.00	3.00	0.23
Vakioaikataulurakenne	0.25	0.50	1.00	3.00	0.20	0.10
Vuoroväli	0.20	0.33	0.33	1.00	0.20	0.05
Junien lisäämismahdollisuus	0.50	0.33	5.00	5.00	1.00	0.23

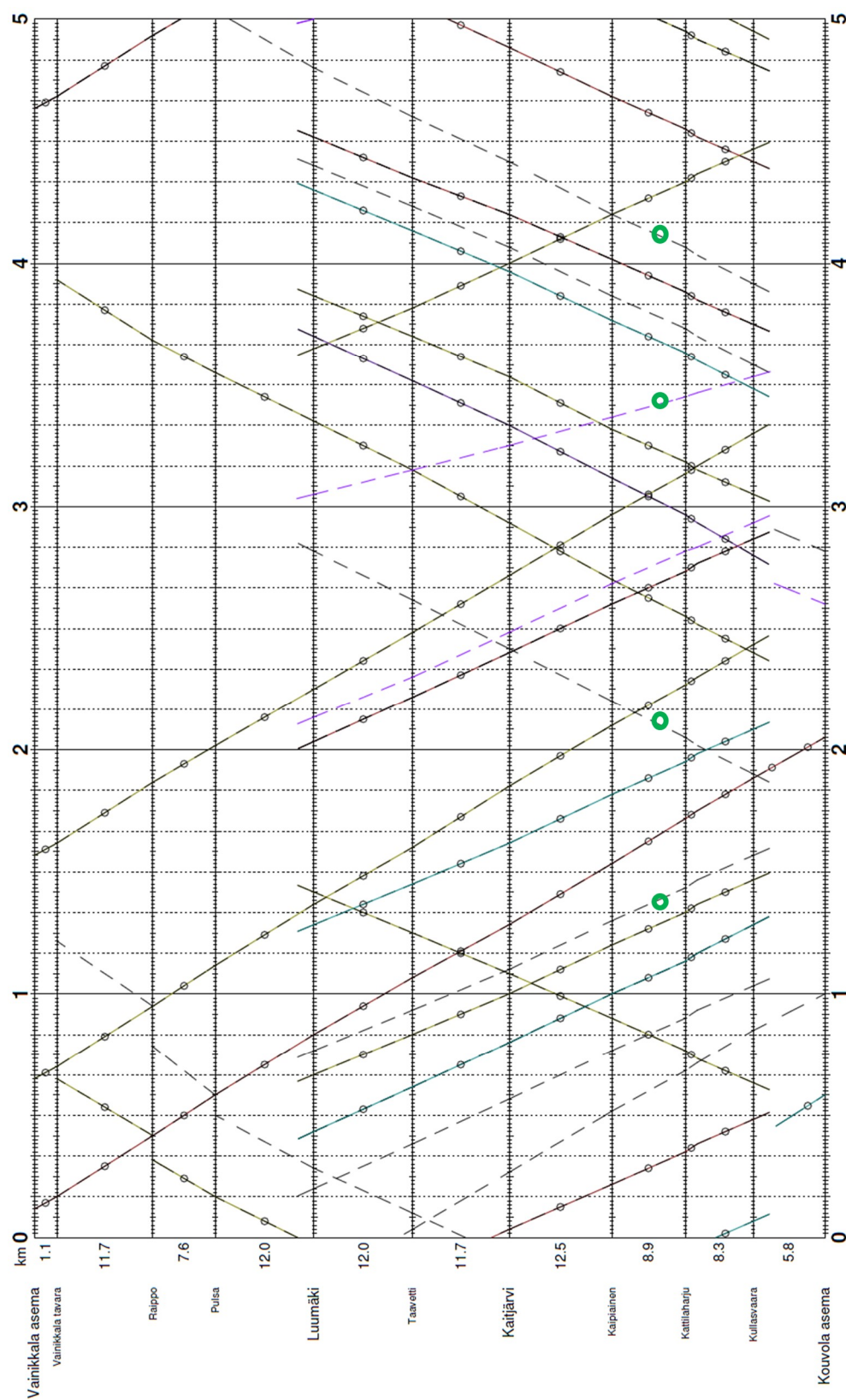
VR4						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	3.00	2.00	3.00	5.00	0.37
Junan ajoaika	0.33	1.00	1.00	3.00	5.00	0.22
Vakioaikataulurakenne	0.50	1.00	1.00	0.33	6.00	0.17
Vuoroväli	0.33	0.33	3.00	1.00	5.00	0.20
Junien lisäämismahdollisuus	0.20	0.20	0.17	0.20	1.00	0.04

VR5						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	4.00	1.00	4.00	0.33	0.27
Junan ajoaika	0.25	1.00	0.50	0.25	0.25	0.05
Vakioaikataulurakenne	1.00	2.00	1.00	0.25	1.00	0.13
Vuoroväli	0.25	4.00	4.00	1.00	4.00	0.33
Junien lisäämismahdollisuus	3.00	4.00	1.00	0.25	1.00	0.23

HSL						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	0.33	7.00	3.00	1.00	0.23
Junan ajoaika	3.00	1.00	7.00	3.00	1.00	0.35
Vakioaikataulurakenne	0.14	0.14	1.00	0.20	0.14	0.03
Vuoroväli	0.33	0.33	5.00	1.00	0.33	0.11
Junien lisäämismahdollisuus	1.00	1.00	7.00	3.00	1.00	0.28

Tavaraliikenteen konsultti						
Kriteeri	Häiriösietoisuus	Junan ajoaika	Vakioaikataulurakenne	Vuoroväli	Junien lisäämismahdollisuus	Painoarvo
Häiriösietoisuus	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	0.27
Junan ajoaika	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	0.27
Vakioaikataulurakenne	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	0.27
Vuoroväli	0.33	0.33	0.33	1.00	1.00	0.09
Junien lisäämismahdollisuus	0.33	0.33	0.33	1.00	1.00	0.09

Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 0.00–5.00 perjantaisin 05/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot



Luumäki–Kullasvaara 0.30–4.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
7 tavarajunaa	1 tavarajuna	
1 lisätavarajuna	1 lisätavarajuna	

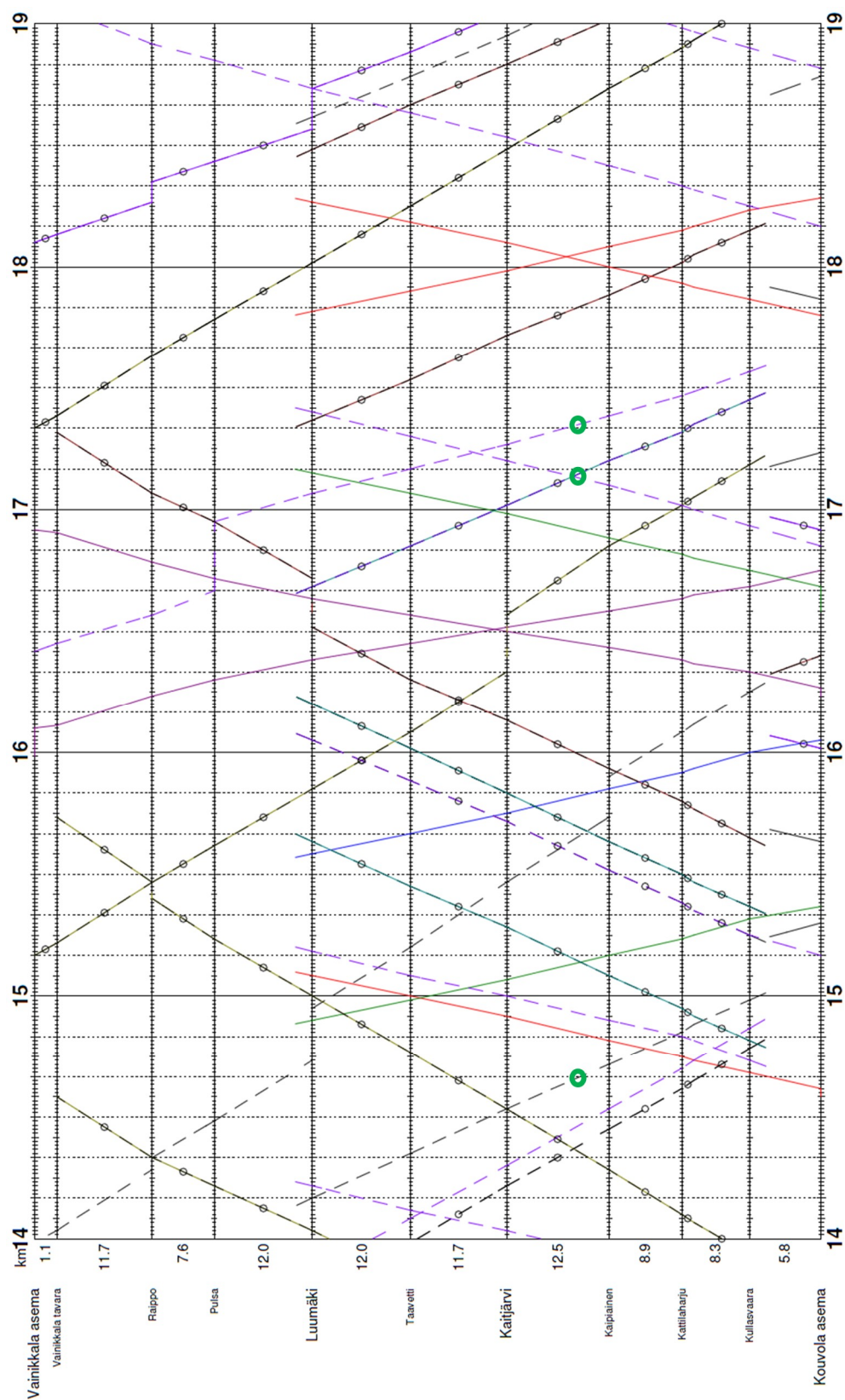
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kullasvaara	Luumäki	Pienin
1	76	83	76
2	30	32	30
3	24	22	22
4	15	10	10
5	26	26	26
6	6	6	6
7	10	7	7
8	10		10
9	40		40

Kullasvaara–Luumäki 0.30–4.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
7 tavarajunaa		1 tavarajuna
2 lisätavarajunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Luumäki	Kullasvaara	Pienin
1		11	11
2	6	6	6
3	4	19	4
4	27	12	12
5	5	21	5
6	40	26	26
7	13	26	13
8	48	14	14
9	36	56	36

Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 14.30–18.30 perjantaisin 5/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot



Kullasvaara–Luumäki 14.30–18.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa		1 tavarajuna
3 tavarajunaa		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kullasvaara	Luumäki	Pienin
1		5	5
2	8	33	8
3	33	34	33
4	17	19	17
5	41	7	7
6	25	31	25
7	11	15	11
8	56	52	52

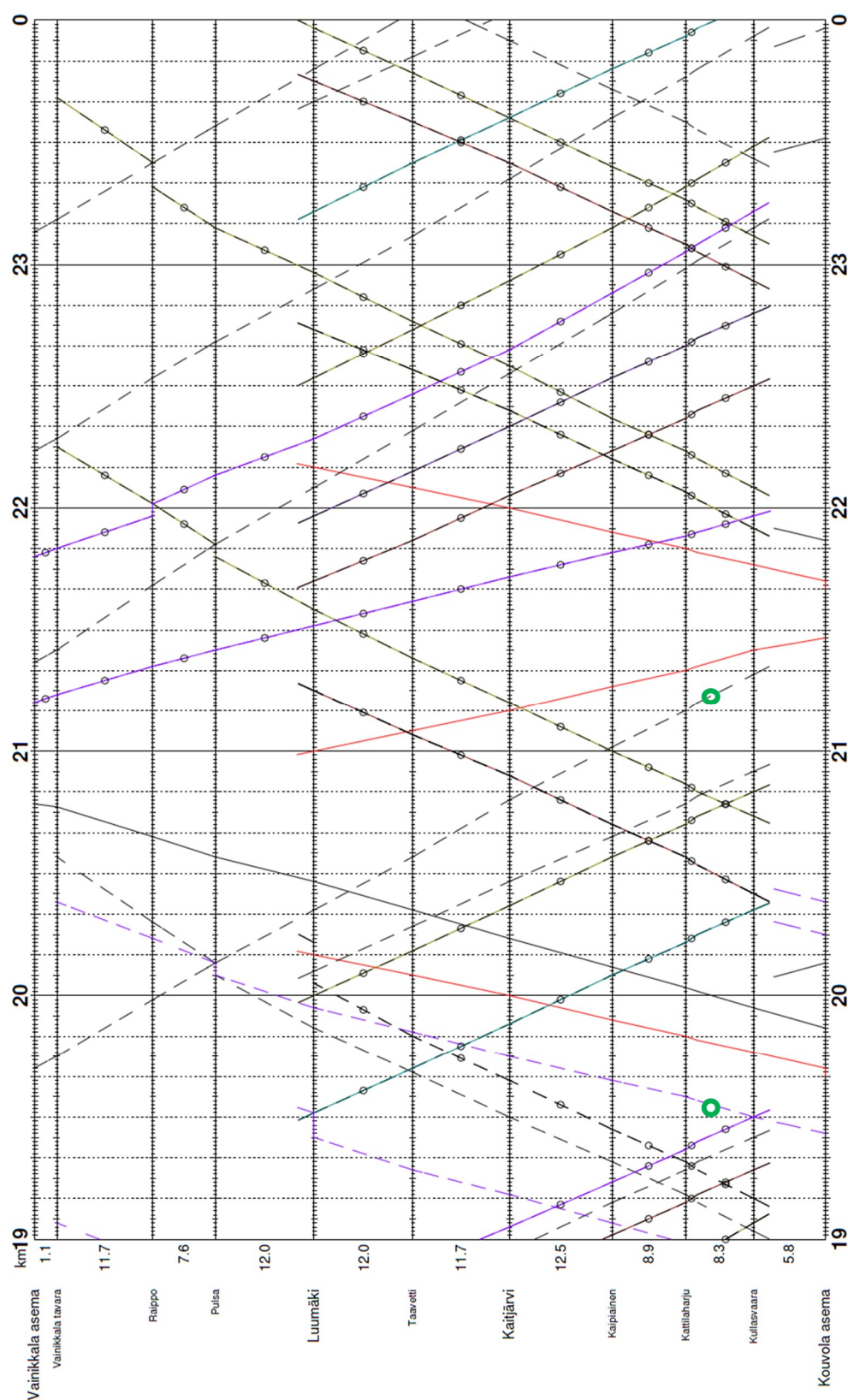
Luumäki–Kullasvaara 14.30–18.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa	2 tavarajunaa	1 lisätavarajuna
3 tavarajunaa		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Luumäki	Kullasvaara	Pienin
1		20	20
2	41	41	41
3	16	41	16
4	32	11 *	11
5	3*	30	3
6	18	16	16
7	23	7	7
8	18	35	18
9	27	5	5
10	12		12
11	28		28

* Junaohitus Uusikylässä

Kouvola–Vainikkala-aikataulu klo 19.00–24.00 perjantaisin 5/2011 ja Luumäki–Vainikkala-rataosan lähtötiedot



Luumäki–Kullasvaara 19.30–23.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
3 kaukojuna	2 tavarajuna	
4 tavarajuna		
1 lisätavarajuna		

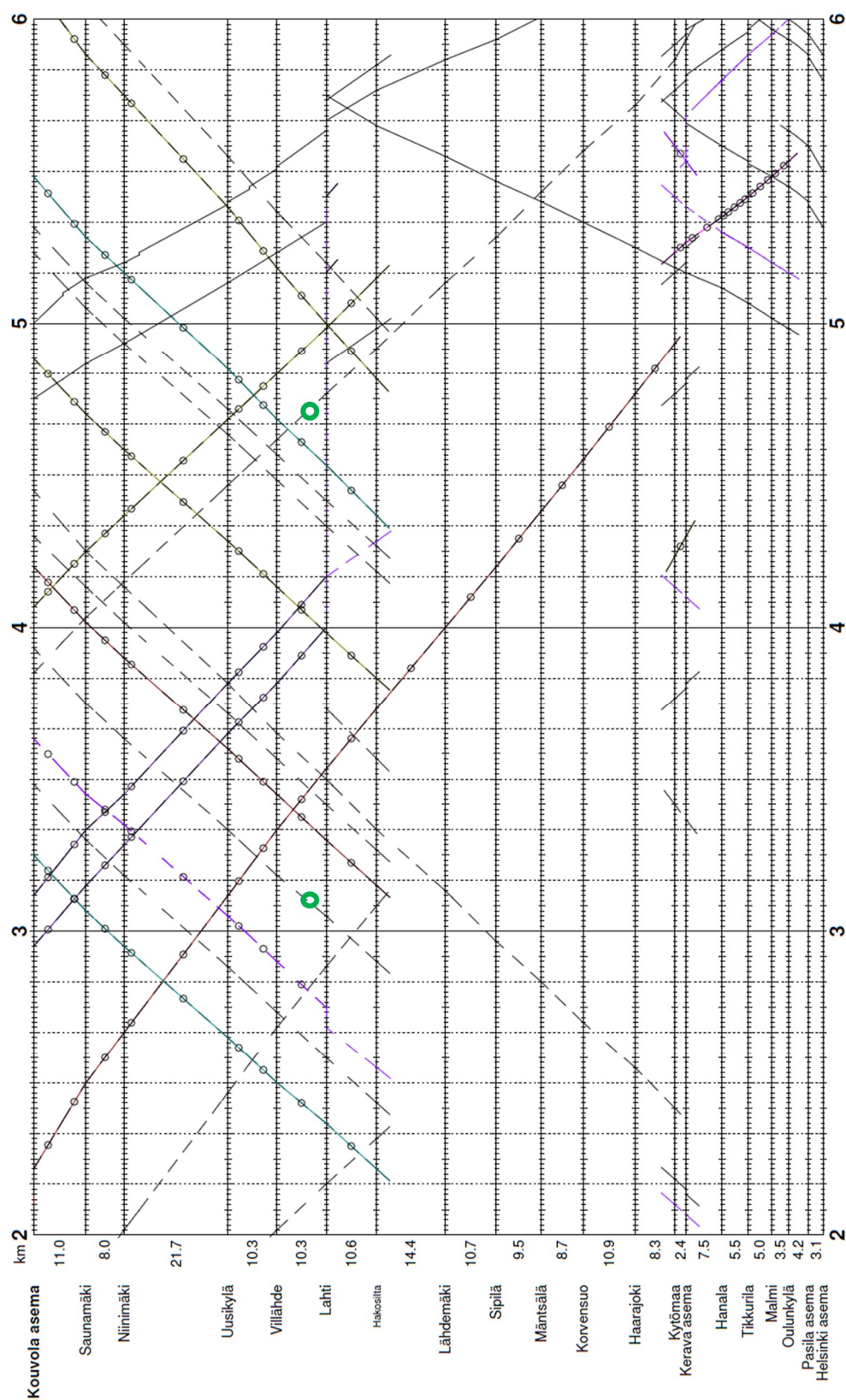
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kullasvaara	Luumäki	Pienin
1	15	13	13
2	11	18	11
3	28	47	28
4	19	20	19
5	62	35	35
6	9	34	9
7	10	14	10
8	51		51
9	11		11
10	41		41

Kullasvaara–Luumäki 19.30–23.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
1 kaukojuna	1 tavarajuna	1 tavarajuna
7 tavarajuna		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Luumäki	Kullasvaara	Pienin
1		40	40
2	29	29	29
3	21	29	21
4	39	6	6
5	31	33	31
6	11	32	11
7	16	18	16
8	19	25	19
9	15	16	15
10	41		41

Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 2.00–6.00 perjantaisin 5/2011 ja Lahti–Kouvola-rataosan lähtötiedot



Lahti–Kouvola 2.00–6.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 tavarajunaa	1 tavarajuna	
1 lisätavarajuna		

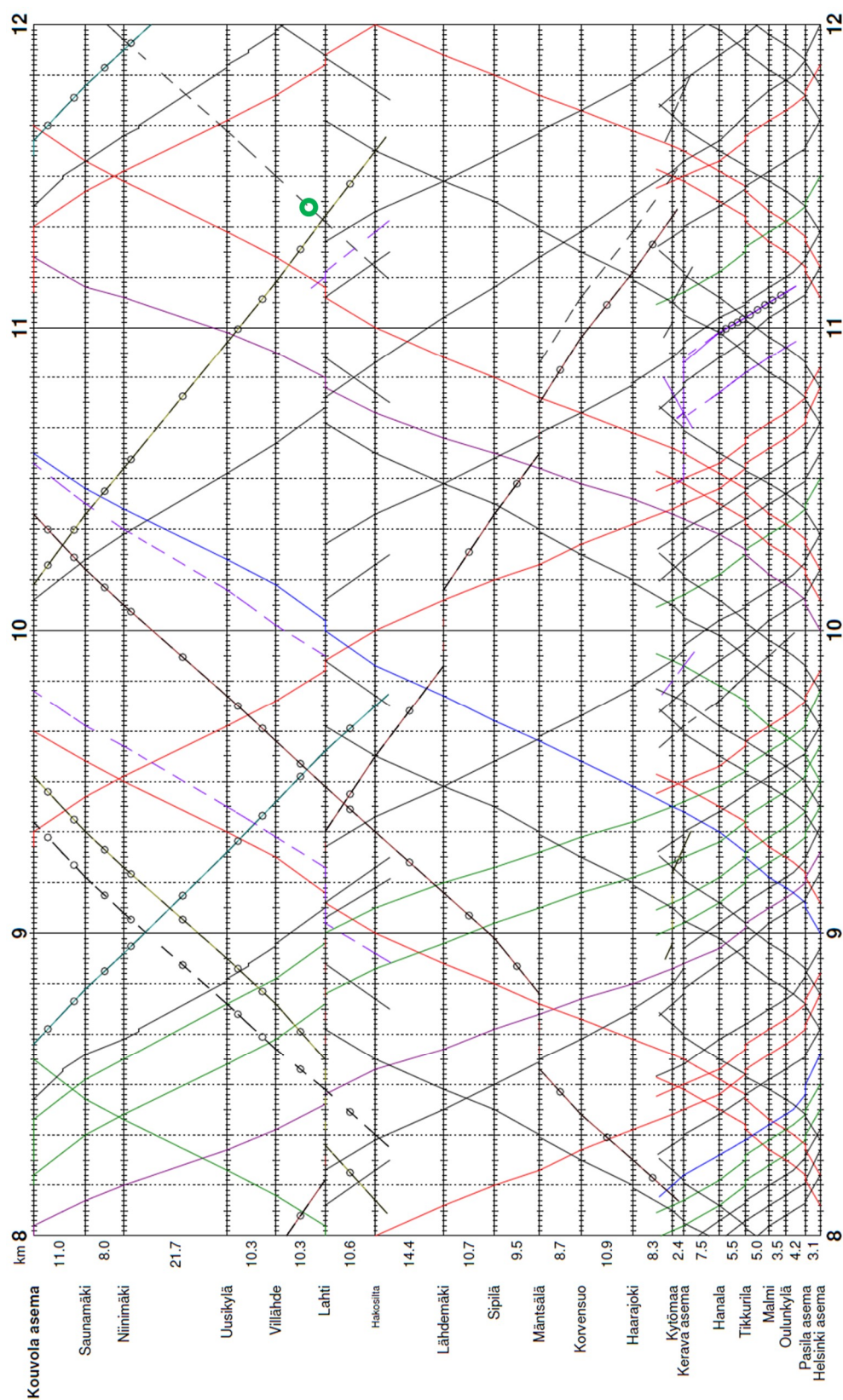
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lahti	Kouvola	Pienin
1	23	23	23
2	18	18	18
3	15	16	15
4	41	41	41
5	32	32	32
6	28	38	28

Kouvola–Lahti 2.00–6.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
2 lähijunaa		
4 tavarajunaa		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kouvola	Lahti	Pienin
1	40	28	28
2	10	10	10
3	44	36	36
4	13	13	13
5	41	21	21
6	15	18	15

Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 8.00–12.00 perjantaisin 5/2011 ja Lahti–Kouvola-rataosan lähtötiedot



Kouvola–Lahti 8.00–12.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 kaukojunaa	1 lähijuna	
2 tavarajunaa	1 lisätavarajuna	

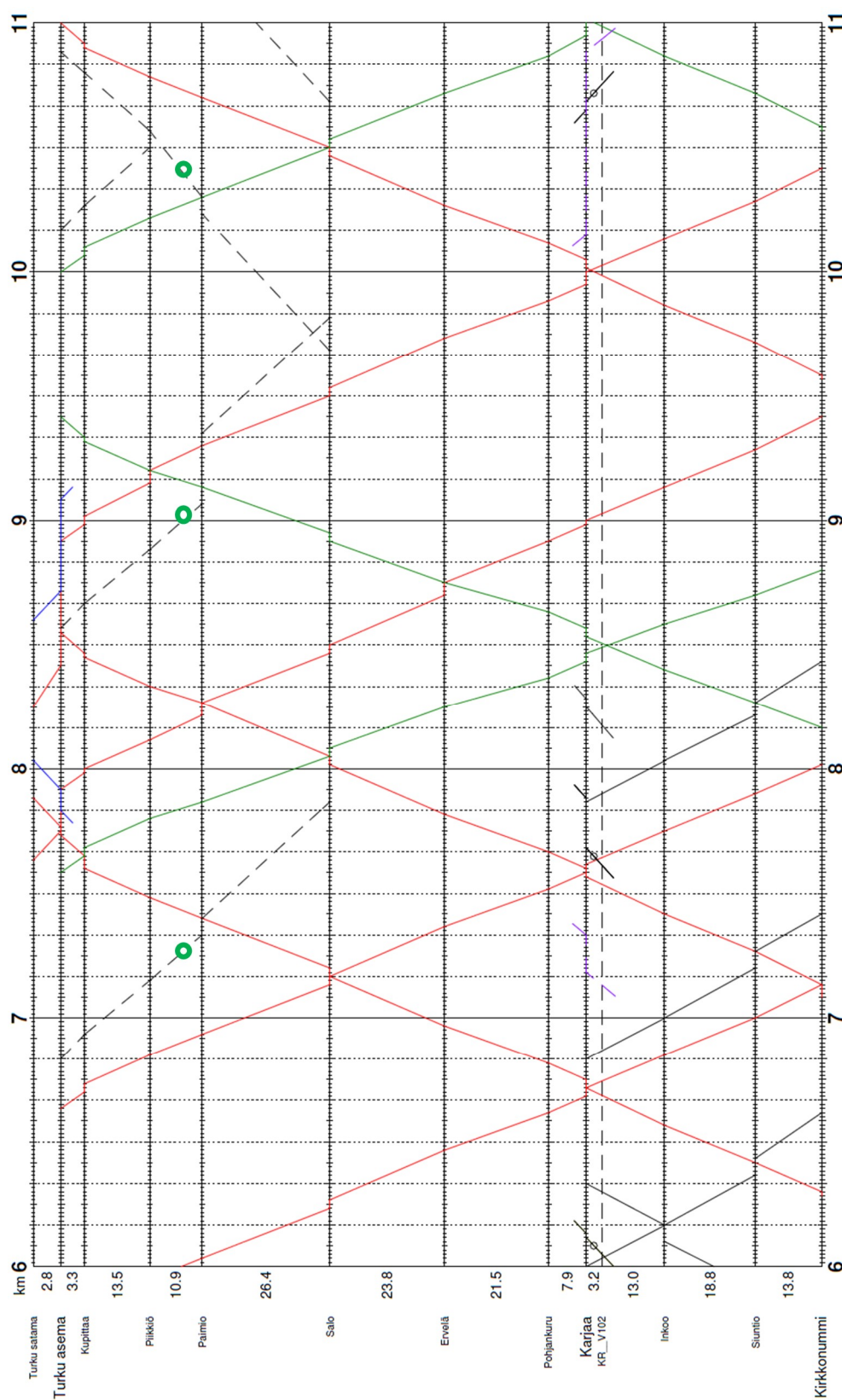
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lahti	Kouvola	Pienin
1	33	56	33
2	33	9	9
3	21	43	21
4	33	12	12
5	48	39	39
6	18	26	18
7	13		13
8	33		33

Kouvola–Lahti 8.00–12.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa	1 kaukojuna	1 kaukojuna
1 lähijuna	1 lähijuna	
4 tavarajunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kouvola	Lahti	Pienin
1		15	15
2	10	20	10
3	11	12	11
4	4	7	4
5	11	31	11
6	42	16	16
7	46	52	46
8	3	39	3
9	71	30	30
10	4		4
11	12		12

Kirkkonummi–Turku satama-aikataulu klo 6.00–11.00 perjantaisin 5/2011 ja
Karjaa–Kupittaa-rataosan lähtötiedot



Karjaa–Salo 6.30–11.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Karjaa	Salo	Pienin
1	51	51	51
2	58	54	54
3	89	94	89

Salo–Karjaa 6.30–11.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 kaukojunaa		1 kaukojuna

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Salo	Karjaa	Pienin
1	54		54
2	55	51	51
3	23	33	23
4	62	57	57
5	60	60	60

Salo–Kupittaa 6.30–11.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Salo	Kupittaa	Pienin
1	51	51	51
2	54	52	52
3	44	89	44
4	49	6	6

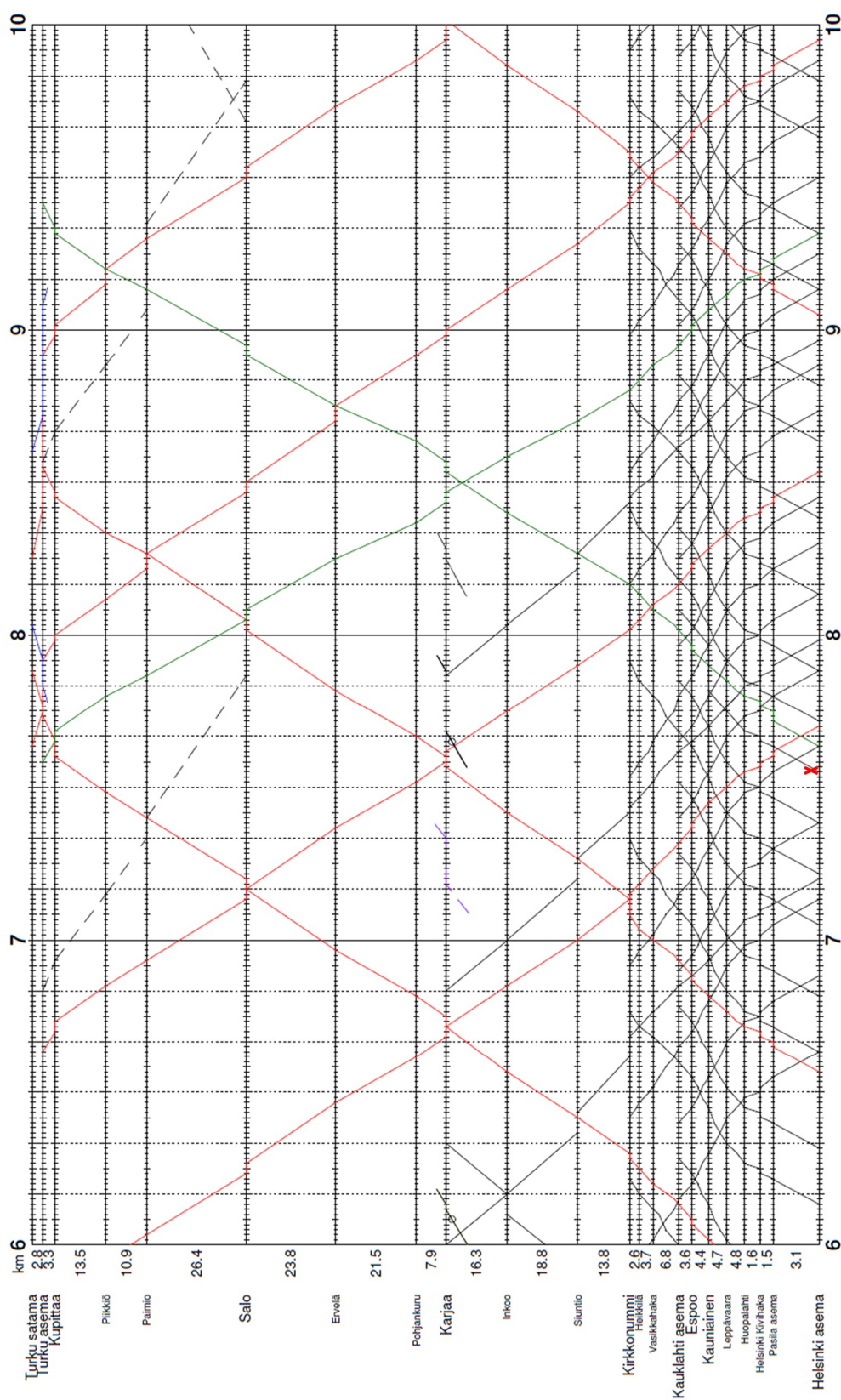
Kupittaa–Salo 6.30–11.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 kaukojunaa	1 kaukojuna	
2 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kupittaa	Salo	Pienin
1	12	44	12
2	45	11	11
3	19	26	19
4	40	62	40
5	21	14*	14
6	3*	19	3
7	57	41	41
8	60		60

* Junaohitus Paimion asemalla

Helsinki–Turku satama-aikataulu klo 6.00–10.00 perjantaisin 5/2011 ja Pasila–Kirkkonummi-rataosan lähtötiedot



Pasila–Leppävaara 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
3 kaukojunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
16 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Pasila	Leppävaara	Pienin
1		19	19
2	11	11	11
3	16	15	15
4	3	4	3
5	11	11	11
6	14	14	14
7	10	10	10
8	10	10	10
9	10	10	10
10	17	16	16
11	10	10	10
12	15	15	15
13	15	15	15
14	15	15	15
15	11	11	11
16	15	14	15
17	4	5	4
18	14	11	11
19	19	19	19
20	11		11

Leppävaara–Pasila 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa	1 lähijuna	
19 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Leppävaara	Pasila	Pienin
1	15	15	15
2	15	15	15
3	5	4	4
4	10	11	10
5	15	15	15
6	5	3	3
7	10	11	10
8	6	6	6
9	10	9	9
10	10	10	10
11	9	9	9
12	6	4	4
13	11	12	11
14	9	9	9
15	6	5	5
16	9	10	9
17	7	7	7
18	5	3	3
19	10	11	10
20	12	12	12
21	11	11	11
22	5	3	3
23	10		10

Leppävaara–Kauklahti 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
3 kaukojunaa	1 lähijuna	1 kaukojuna
16 lähijunaa		1 lähijuna

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Leppävaara	Kauklahti	Pienin
1		8	8
2		9	9
3	19	19	19
4	11	11	11
5	15	9	9
6	4	10	4
7	11	11	11
8	14	14	14
9	10	10	10
10	10	10	10
11	14	10	10
12	4	10	4
13	10	10	10
14	15	15	15
15	15	15	15
16	15	15	15
17	11	11	11
18	14	8	8
19	5	11	5
20	11	11	11
21	19		19

Kauklahti–Leppävaara 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa	1 lähijuna	
20 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kauklahti	Leppävaara	Pienin
1	15	15	15
2	15	15	15
3	12	5	5
4	3	10	3
5	15	15	15
6	10	5	5
7	5	10	5
8	13	6	6
9	2	9	2
10	9	10	9
11	10	9	9
12	12	6	6
13	5	11	5
14	9	10	9
15	13	6	6
16	2	9	2
17	7	7	7
18	11	5	5
19	4	10	4
20	12	12	12
21	11	11	11
22	11	5	5
23	4	10	4
24	15		15

Kauklahti–Kirkkonummi 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa		
8 lähijunaa		

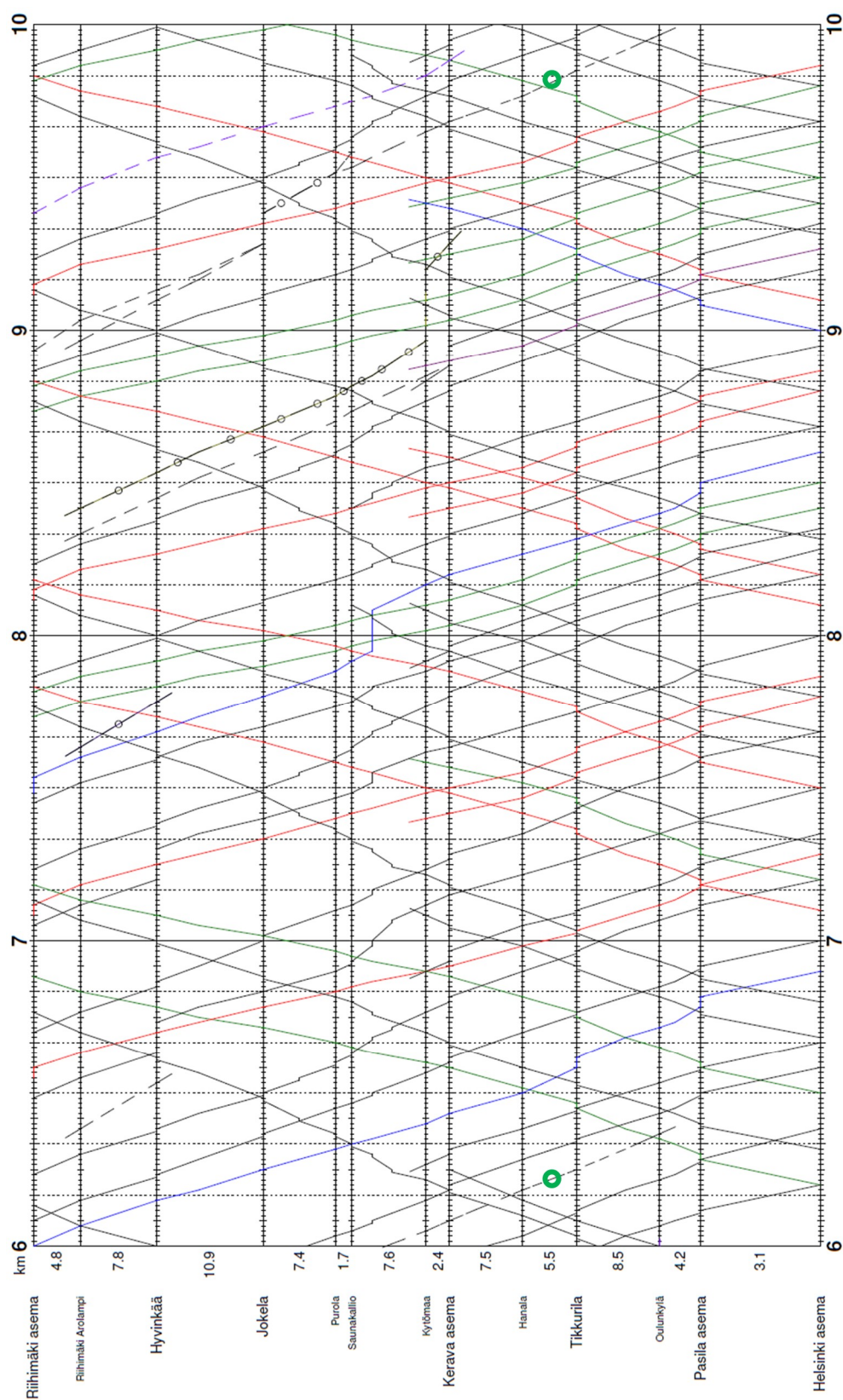
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kauklahti	Kirkkonummi	Pienin
1	8	4	4
2	28	29	28
3	20	19	19
4	10	15	10
5	36	35	35
6	20	15	15
7	11	15	11
8	26	21	21
9	30	34	30
10	19	14	14
11	11	12	11

Kirkkonummi–Kauklahti 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
4 kaukojunaa		
10 lähijunaa	1 lähijuna	1 lähijuna

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kirkkonummi	Kauklahti	Pienin
1		30	30
2	16	12	12
3	14	18	14
4	15	10	10
5	17	18	17
6	6	11	6
7	29	22	22
8	9	14	9
9	17	13	13
10	5	9	5
11	16	11	11
12	11	16	11
13	27	22	22
14	4	4	4
15	25		25

Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 6.00–10.00 perjantaisin 5/2011 ja Oulunkylä–Kerava-rataosan lähtötiedot



Oulunkylä–Kerava 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 kaukojunaa	2 lähijunaa	1 lähijuna
13 lähijunaa		
2 lisätavarajunaa		

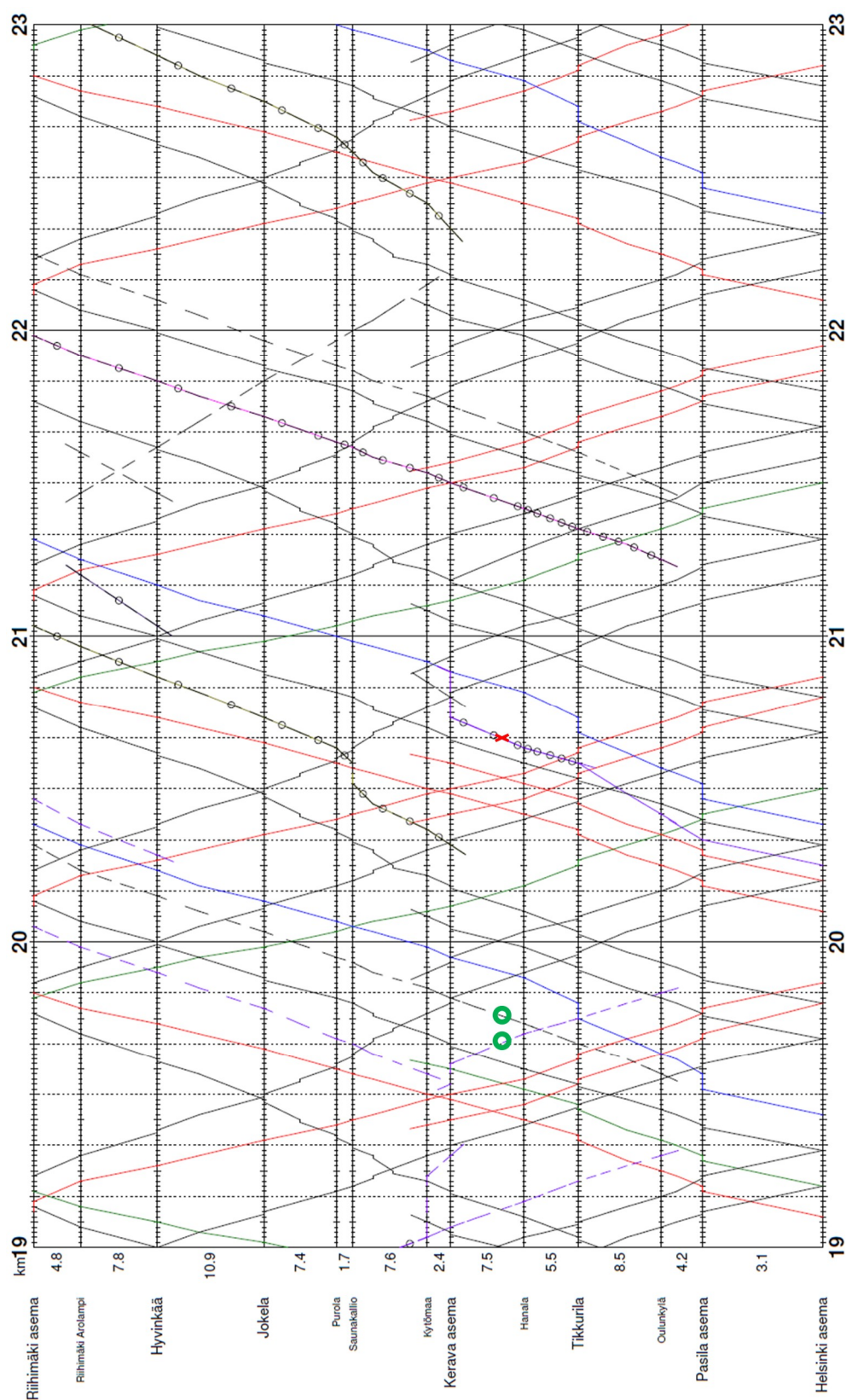
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Oulunkylä	Kerava	Pienin
1		5	5
2	21	20	20
3	6	4	4
4	12	14	12
5	10	9	9
6	7	8	7
7	19	19	19
8	6	5	5
9	6	5	5
10	12	13	12
11	5	4	4
12	5	5	5
13	7	8	7
14	19	19	19
15	6	6	6
16	6	4	4
17	22	22	22
18	7	8	7
19	13	13	13
20	6	5	5
21	12	10	10
22	6	6	6
23	6	7	6
24	10		10

Kerava–Oulunkylä 6.00–10.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
15 kaukojunaa	2 lähijunaa	2 lähijunaa
16 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Oulunkylä	Pienin
1	7	9	7
2	7	4	4
3	7	6	6
4	7	10	7
5	11	8	8
6	12	13	12
7	6	3	3
8	3	4	3
9	11	10	10
10	8	11	8
11	8	6	6
12	5	5	5
13	8	7	7
14	11	14	11
15	6	4	4
16	3	4	3
17	4	4	4
18	5	5	5
19	5	3	3
20	8	9	8
21	5	4	4
22	5	4	4
23	4	4	4
24	15	17	15
25	5	3	3
26	3	4	3
27	4	5	4
28	5	5	5
29	8	7	7
30	5	5	5
31	6	5	5
32	4	5	4
33	11	14	11
34	9		9
35	8		8

Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 19.00–23.00 perjantaisin 5/2011 ja Oulunkylä–Kerava-rataosan lähtötiedot



Oulunkylä–Kerava 19.00–23.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
7 kaukojunaa	2 lähijunaa	2 lähijunaa
10 lähijunaa		
1 lisätavarajuna		

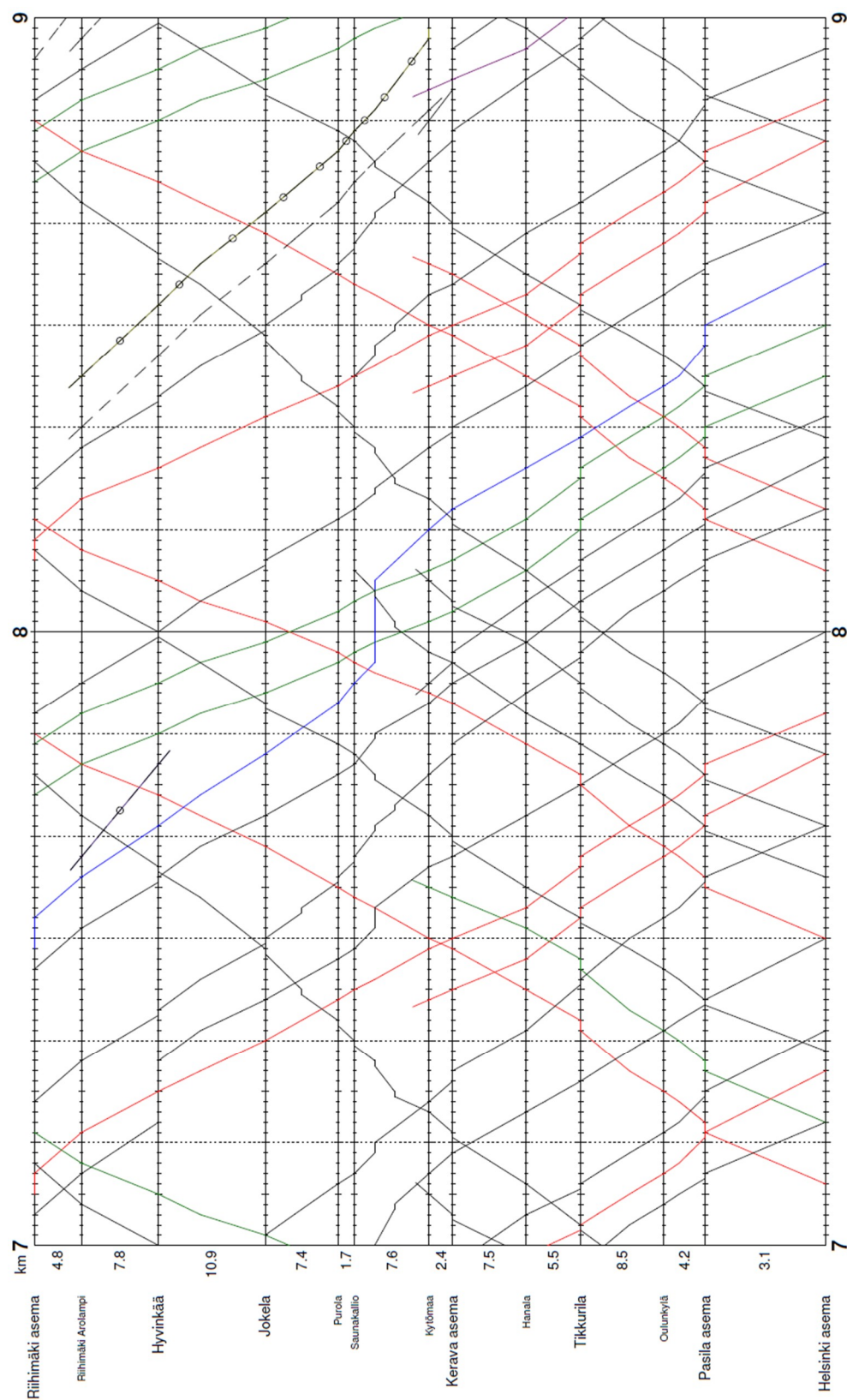
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Oulunkylä	Kerava	Pienin
1		8	8
2		18	18
3	6	6	6
4	6	4	4
5	7	9	7
6	4	8	4
7	11	5	5
8	7	8	7
9	19	18	18
10	6	6	6
11	6	4	4
12	7	13	7
13	15	9	9
14	7	8	7
15	19	19	19
16	12	9	9
17	22	22	22
18	7	8	7
19	18	18	18
20	12	10	10
21	7	13	7
22	15		15
23	6		6

Kerava–Oulunkylä 19.00–23.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 kaukojunaa	2 lähijunaa	2 lähijunaa
10 lähijunaa		
1 lisätavarajuna		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Oulunkylä	Pienin
1		6	6
2		20	20
3	5	5	5
4	5	5	5
5	6	7	6
6	13	14	13
7	8	6	6
8	10	11	10
9	13	12	12
10	5	5	5
11	5	5	5
12	19	21	19
13	8	6	6
14	9	11	9
15	4	5	4
16	9	7	7
17	10	9	9
18	4	5	4
19	15	17	15
20	8	6	6
21	33	33	31
22	13	14	13
23	6		6
24	7		7

Helsinki–Riihimäki-aikataulu klo 7.00–9.00 perjantaisin 5/2011 ja Kerava–Tikkurila-rataosan ja vaihtoehtoisten aikataulujen lähtötiedot



Kerava–Tikkurila 7.45–8.49

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 kaukojunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
5 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Oulunkylä	Pienin
1		12	12
2	6	5	5
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	5	4	4
7	8	8	8
8	5	5	5
9	5	5	5
10	4	4	4
11	14		14

Kerava–Tikkurila 7.45–8.49 (puristettu minimijunaväleihin; puskurijakso)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
5 kaukojunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
5 lähijunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Oulunkylä	Pienin
1		4	13
2	5	4	4
3	3	3	3
4	4	4	4
5	4	4	4
6	5	4	4
7	4	5	4
8	4	4	4
9	4	4	4
10	4	5	4
11	30		30

Vaihtoehtoinen 60 min (6 minuutin vuorovälit)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 junaa	1	1

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lähtö	Saapuminen	Pienin
1		6	6
2	6	6	6
3	6	6	6
4	6	6	6
5	6	6	6
6	6	6	6
7	6	6	6
8	6	6	6
9	6	6	6
10	6	6	6
11	6		6

Vaihtoehtoinen 60 min (5 minuutin vuorovälit; puskurijakso)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 juna	1	1

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lähtö	Saapuminen	Pienin
1		6	6
2	5	5	5
3	5	5	5
4	5	5	5
5	5	5	5
6	5	5	5
7	5	5	5
8	5	5	5
9	5	5	5
10	5	5	5
11	15		15

Vaihtoehtoinen 60 min (4 minuutin vuorovälit; puskurijakso)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 juna	1	1

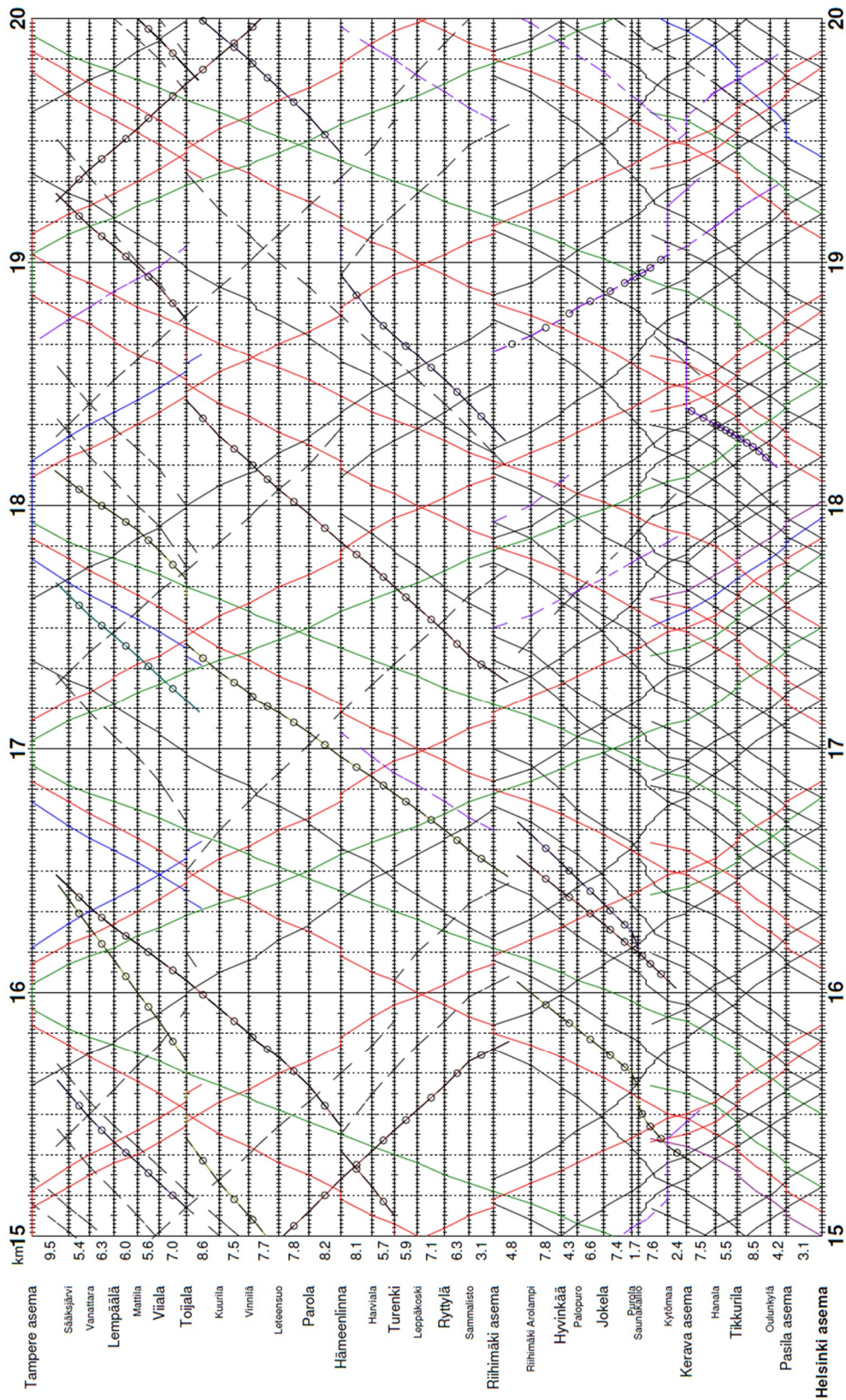
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lähtö	Saapuminen	Pienin
1		6	6
2	4	4	4
3	4	4	4
4	4	4	4
5	4	4	4
6	4	4	4
7	4	4	4
8	4	4	4
9	4	4	4
10	4	4	4
11	24		24

Vaihtoehtoinen 60 min (vaihtelevat vuorovälit; heterogeeninen liikenne)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
10 juna	1	1

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Lähtö	Saapuminen	Pienin
1		6	6
2	6	4	4
3	4	6	4
4	6	4	4
5	8	8	8
6	6	4	4
7	4	6	4
8	6	4	4
9	4	6	4
10	6	4	4
11	8		8

Helsinki–Tampere-aikataulu klo 15.00–20.00 perjantaisin 5/2011 ja Helsinki–Kerava-rataosan lähtötiedot



Helsinki-Kerava 15.30–19.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
12 kaukojunaa	2 kaukojunaa	1 kaukojuna
17 lähijunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
1 tavarajuna		

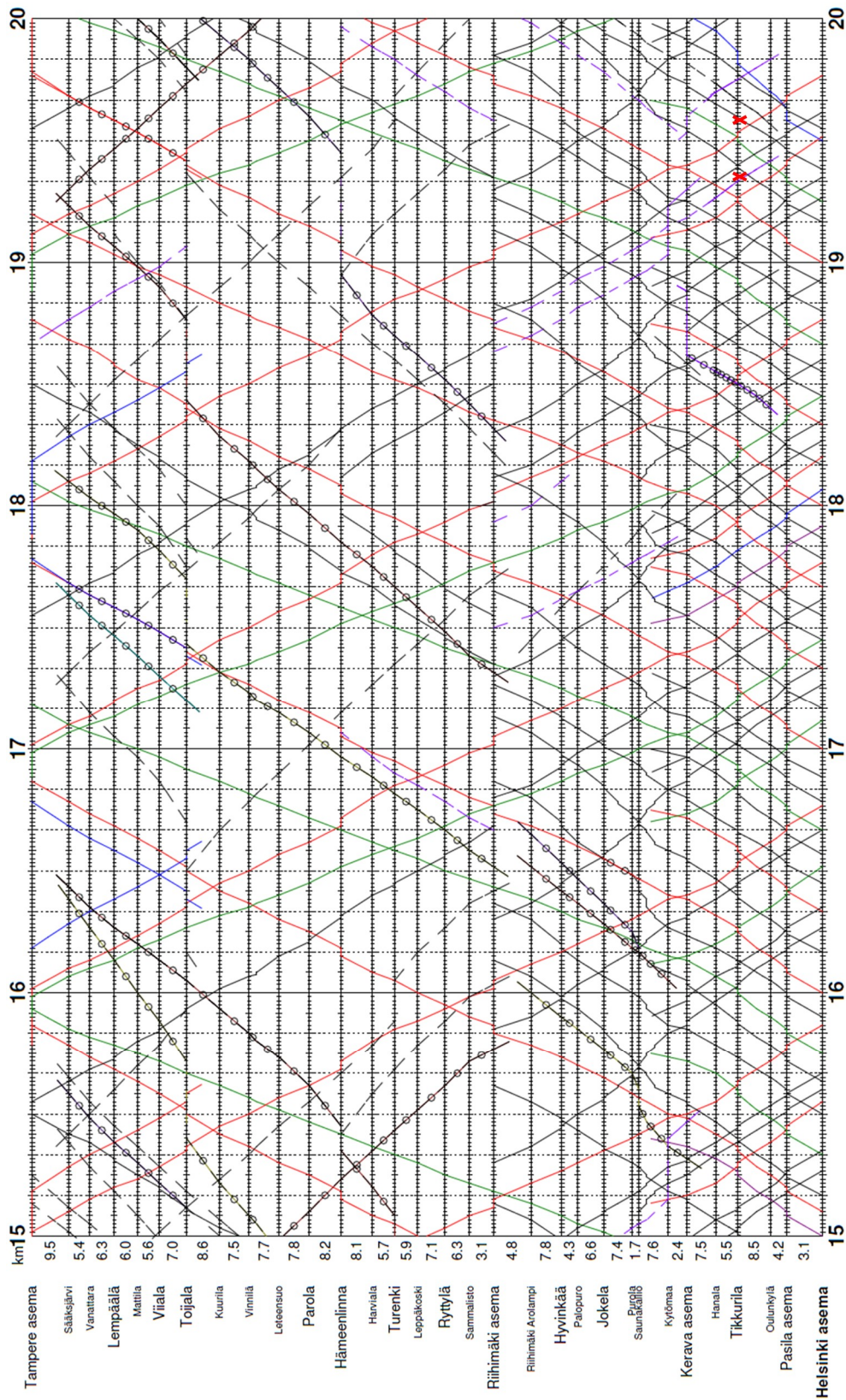
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Helsinki	Kerava	Pienin
1		4	4
2		13	13
3	6	4	4
4	5	8	5
5	7	5	5
6	14	12	12
7	4	7	4
8	6	6	6
9	7	9	7
10	6	5	5
11	5	4	4
12	6	4	4
13	5	5	5
14	7	8	7
15	12	10	10
16	6	9	6
17	6	6	6
18	7	4	4
19	6	7	6
20	5	7	5
21	11	9	9
22	7	8	7
23	4	8	4
24	10	6	6
25	4	5	4
26	6	6	6
27	7	4	4
28	11	14	11
29	11	9	9
30	7	8	7
31	18	19	18
32	6		6
33	7		7
34	7		7

Kerava-Helsinki 15.30–19.30

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
11 kaukojunaa	2 kaukojunaa	1 kaukojuna
12 lähijunaa	1 lähijuna	2 lähijunaa
1 vaununsirto		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Helsinki	Pienin
1		6	6
2		7	7
3		4	4
4	19	20	19
5	8	7	7
6	23	22	22
7	6	7	6
8	4	4	4
9	19	20	19
10	8	7	7
11	10	11	10
12	13	11	11
13	5	7	5
14	5	4	4
15	4	5	4
16	5	4	4
17	7	8	7
18	3	11	3
19	13	13	13
20	5	5	5
21	7	5	5
22	6	6	6
23	5	7	5
24	5	4	4
25	19	20	19
26	8	7	7
27	23		23
28	5		5
29	5		5

Vaihtoehtoinen Helsinki–Tampere-aikataulu klo 15.00–20.00 perjantaisin 5/2011
Helsinki–Kerava-rataosalle ja rataosan lähtötiedot tapaustutkimukseen



Helsinki-Kerava 15.30–19.30
(vaihtoehtoinen)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
12 kaukojunaa	2 kaukojunaa	1 kaukojuna
17 lähijunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
1 tavarajuna		

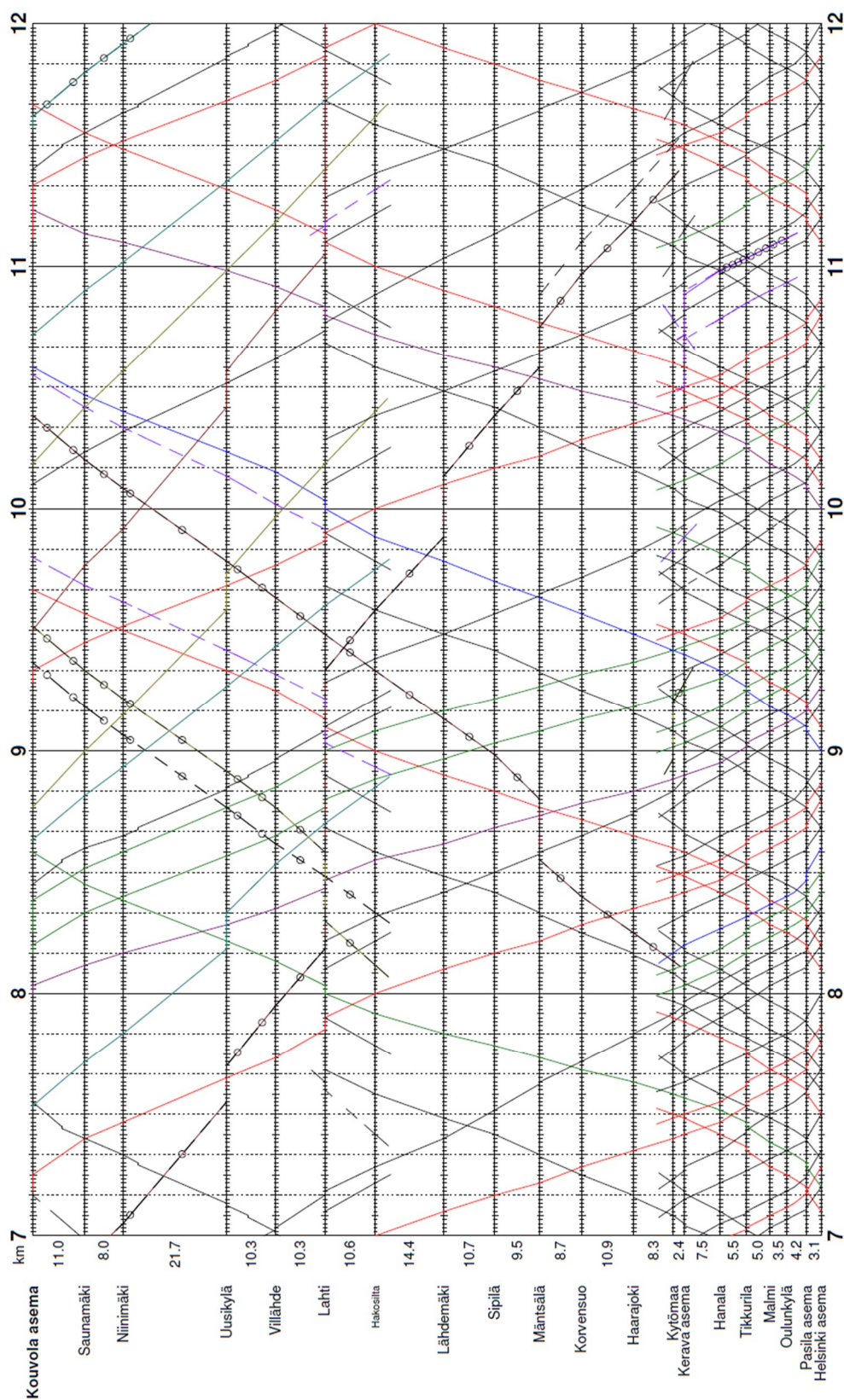
Junavälin #	Junaväli (min)		
	Helsinki	Kerava	Pienin
1		10	10
2		8	8
3	8	11	8
4	7	6	6
5	9	6	6
6	6	9	6
7	10	9	9
8	10	11	10
9	7	4	4
10	7	11	7
11	6	5	5
12	7	5	5
13	6	6	6
14	7	9	7
15	10	9	9
16	10	11	10
17	7	5	5
18	6	6	6
19	7	9	7
20	7	9	7
21	5	6	5
22	8	5	5
23	10	9	9
24	5	5	5
25	5	6	5
26	7	4	4
27	6	7	6
28	7	9	7
29	8	6	6
30	7	7	7
31	5	8	5
32	10		10
33	5		5
34	15		15

Kerava-Helsinki 15.30–19.30
(vaihtoehtoinen)

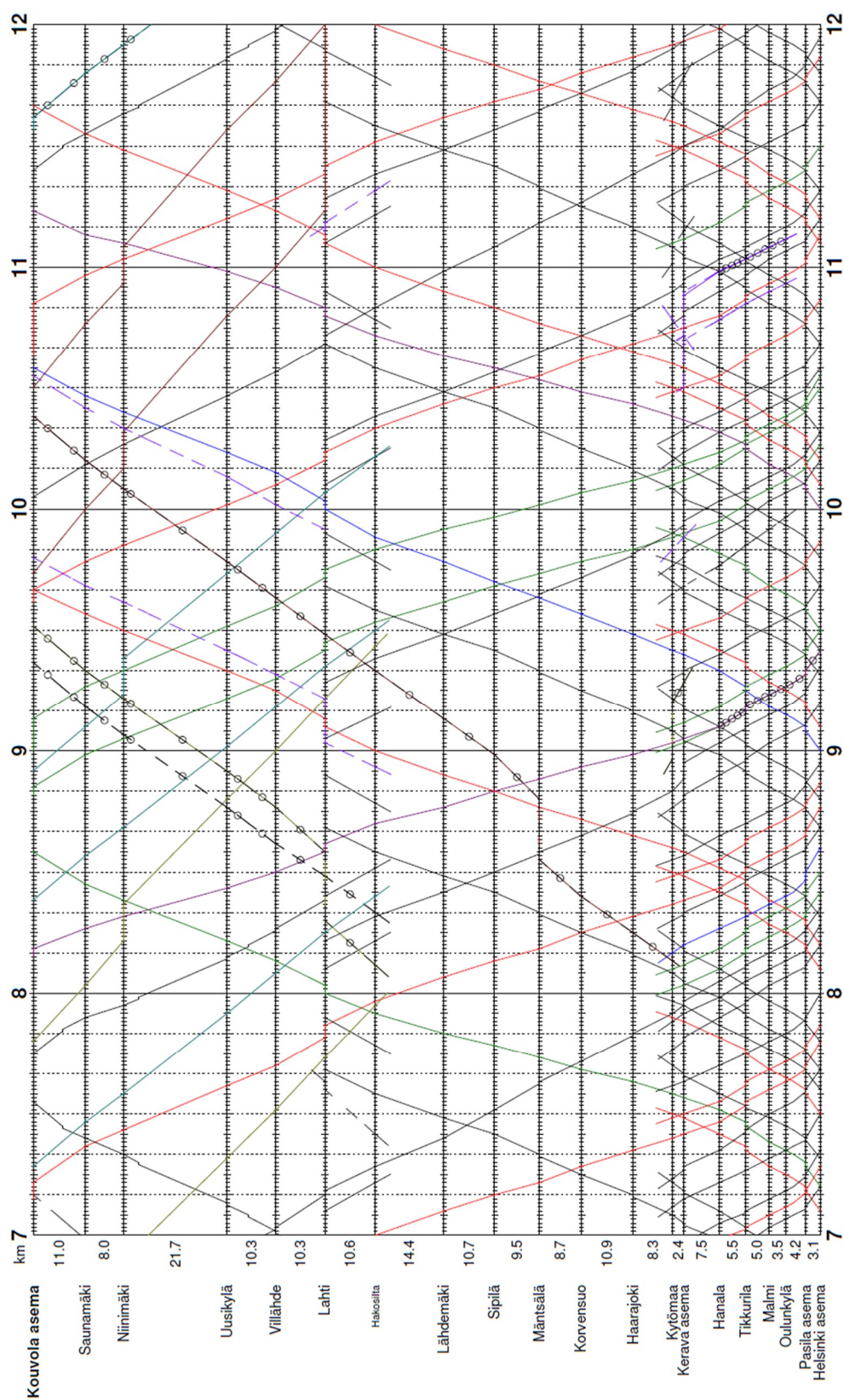
Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
11 kaukojunaa	2 kaukojunaa	1 kaukojuna
12 lähijunaa	1 lähijuna	2 lähijunaa
1 vaununsiirto		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kerava	Helsinki	Pienin
1		4	4
2		4	4
3		12	12
4	23	23	23
5	6	5	5
6	10	10	10
7	10	9	9
8	5	6	5
9	20	21	20
10	9	9	9
11	6	5	5
12	5	7	5
13	12	10	10
14	8	9	8
15	9	9	9
16	7	9	7
17	8	8	8
18	4	4	4
19	5	5	5
20	6	6	6
21	11	9	9
22	9	10	9
23	11	10	10
24	8	9	8
25	10	11	10
26	6	5	5
27	9		9
28	8		8
29	8		8

Tavarajunalisäyksiä sisältävä Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 7.00–12.00
perjantaisin 5/2011 Lahti–Kouvola-rataosalle ja rataosan lähtötiedot



**Vaihtoehtoinen Helsinki–Kouvola-aikataulu klo 7.00–12.00 perjantaisin 5/2011 ja
Lahti–Kouvola-rataosalle ja rataosan lähtötiedot**



Kouvola–Lahti 7.00–12.00

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
9 kaukojunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
1 lähijuna	1 tavarajuna	1 tavarajuna
6 tavarajunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kouvola	Lahti	Pienin
1		41	41
2		6*	6
3	3*	20	3
4	17	15	15
5	30	6*	6
6	3*	16	3
7	10	4	4
8	11	12	11
9	4	7	4
10	11	31	11
11	8	16	8
12	34	6*	6
13	3*	19	3
14	10	33	10
15	36	6*	6
16	3*	19	3
17	5	22	5
18	32	17	17
19	37	11	11
20	4		4
21	12		12

* Junaohitus Uusikylässä

Kouvola–Lahti 7.00–12.00 (vaihtoehtoinen)

Lähtevät ja saapuvat junat	Lähtevät junat	Saapuvat junat
9 kaukojunaa	1 lähijuna	1 lähijuna
1 lähijuna	1 tavarajuna	1 tavarajuna
6 tavarajunaa		

Junavälin #	Junaväli (min)		
	Kouvola	Lahti	Pienin
1		34	34
2		5	5
3	4	6	4
4	26	8	8
5	4	12	4
6	23	6*	6
7	3*	38	3
8	12	8	8
9	28	4	4
10	4	18	4
11	13	6*	6
12	3*	12	3
13	32	8	8
14	4	29	4
15	19	6*	6
16	3*	33	3
17	27	9	9
18	21	6*	6
19	3*	37	3
20	33		33
21	13		13

* Junaohitus Niinimäessä